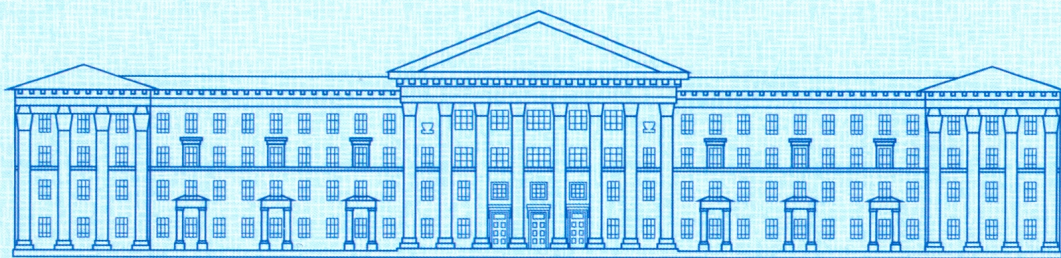




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 4(76)

•• 2018 ••

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 4 (76) 2018

Виходить 6 разів на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Наука та прогрес транспорту
Автоматизовані системи управління на транспорті
Екологія на транспорті
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт
Залізнична колія
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Моделювання задач транспорту та економіки
Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми
Промисловий транспорт
Рухомий склад залізниць і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2018

Засновник:
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Пшінько О. М., доктор технічних наук
Мямлін С. В., доктор технічних наук
Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. С., Босов А. А., Вакуленко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейгутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Настечик М. П., Нетеса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. І., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Республіка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики Лодзинської політехніки, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богемії, Чеська Республіка); Зіммер К. (Інститут Електротехніки Варшавської політехніки, Республіка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Республіка Казахстан); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржелецькі Р. (Гданська морська академія, Республіка Польща); Тітова Т. С. (Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща); Шепонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 31.08.2018 р., протокол № 1

Видавець Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труди Дніпропетровського інститута інженерів залізничного транспорту»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 4 (76) 2018

Выходит 6 раз в год ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Основан в августе 2003 г.

Наука и прогресс транспорта
Автоматизированные системы управления на транспорте
Экология на транспорте
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт
Железнодорожный путь
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Моделирование задач транспорта и экономики
Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы
Промышленный транспорт
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов
Транспортное строительство

Днепро

2018

Учредитель:
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Мямлин С. В., доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):

Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднарь Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринец В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненный О. Н., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жуковицкий И. В., Заблудовский В. А., Казакевич М. И., Капица М. И., Копытко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. И., Штапенко Э. Ф., Эйтугис Г. Д., Яришкина Л. А.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Институт железнодорожного транспорта, Варшава, Республика Польша); Вайчунас Г. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Васяк И. (Институт электроэнергетики Лодзинской политехники, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Университет Западной Богемии, Чешская Республика); Зиммер К. (Институт Электротехники Варшавской политехники, Республика Польша); Куанышев Б. М. (Казахская академия транспорта и коммуникаций, Республика Казахстан); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковски А. (Силезская политехника, Республика Польша); Стржелецки Р. (Гданьская морская академия, Республика Польша); Титова Т. С. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация); Худзикевиц А. (Варшавский политехнический университет, Республика Польша); Шепонг Адам (Варшавский политехнический университет, Республика Польша).

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.

Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).

Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.

Печатается по решению ученого совета университета от 31.08.2018 г., протокол № 1

Издатель

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна (г. Днипро)
Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днипро, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журнала: <http://stp.diit.edu.ua/>

Издание публикуется с 1936 г.:

- 1936–1993 гг. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 гг. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 гг. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- с 2013 г. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 4 (76) 2018

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Science and Transport Progress
Transport Automated Control Systems
Transport Ecology
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport
Railway Track
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling
Material Science
Transport and Economic Tasks Modeling
Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanisms
Industrial Transport
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2018

Founder:

DNIPROPETROVSK NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Afanasov A. M., Bannikov D. O., Barash Yu. S., Biliaiev M. M., Bobrovskiy V. I., Bobyr D. V., Bodnar B. J., Bosov A. A., Crivchick G. G., Dotsenko O. M., Dudkina V. V., Eitutis H. D., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Hnennyi O. M., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kapitsa M. I., Kazakevich M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Okovytyy S. I., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Shtapenko E. P., Shynkarenko V. I., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Bialon A. (Railway Institute, Warszawa, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (The University of West Bohemia, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kuanyshev B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», USA); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime Academy, Republic of Poland); Szelaż Adam (Warsaw University of Technology, Republic of Poland), Titova T. S. (Petersburg State Transport University, Russian Federation); Vaiciunas G. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zymmer K. (Electrotechnical Institute, Republic of Poland)

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 31.08.2018, Protocol no. 1
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175),
since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, И. В. КАЛАШНИКОВ^{2*}, В. А. КОЗАЧИНА^{3*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}ГП «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзалізничпроект», ул. Конарева, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПОЯСА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЕРАКТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Цель. Работа предполагает разработку 2D численной модели для расчета «пояса безопасности» в случае теракта с использованием химического агента. Пояс безопасности является границей, за которой эмиссия опасного вещества при теракте приведет к нежелательным последствиям на месте расположения объекта атаки. **Методика.** Для решения поставленной задачи используется уравнение, сопряженное с уравнением массопереноса в атмосферном воздухе химического агента, выброшенного в случае теракта. При моделировании учитывается поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего сопряженного уравнения вводятся новые переменные и применяется неявная разностная схема расщепления. Особенностью разработанной численной модели является возможность оперативной оценки положения пояса безопасности возле возможного объекта атаки. **Результаты.** Разработанная численная модель и компьютерная программа могут быть использованы для научно обоснованной оценки положения пояса безопасности возле значимых объектов в случае возможных терактов с применением химических (биологических) агентов. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса при разработке плана ликвидации аварийной ситуации. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности предложенного метода расчета положения пояса безопасности в случае теракта с использованием химического агента. **Научная новизна.** Предложен эффективный метод расчета положения пояса безопасности возле объекта, который может быть целью террористической атаки с применением химически опасного вещества. Метод основан на численном интегрировании уравнения, являющегося сопряженным к уравнению массопереноса химически опасных веществ в атмосферном воздухе. **Практическая значимость.** Предложенный метод расчета положения пояса безопасности возле объекта, который может быть целью террористической атаки с применением химически опасного вещества, может быть использован для организации защитных мероприятий, направленных на минимизацию последствий терактов.

Ключевые слова: теракт; химическое загрязнение; сопряженное уравнение; численное моделирование; загрязнение атмосферы

Введение

Проблема терактов приобрела в последнее время очень большое значение [1, 2, 4-14]. Минимизация последствий терактов – крайне важная задача, успешное решение которой зависит

от ряда факторов и условий. Одним из факторов, который минимизирует негативные последствия терактов с применением химически опасных веществ, является наличие «пояса безопасности» возле возможного объекта атаки (рис.1).

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Это такая граница, за которой выброс опасного агента приведет к крайне нежелательному загрязнению воздушной среды с тяжелыми последствиями для человека.



Рис. 1. Гипотетическая цель при террористической атаке:

1 – цель (точка «интереса»), 2 – граница пояса безопасности, 3 – направление ветра.

Fig. 1. Hypothetical target during terrorist attack:
1 – target of terrorist attack; 2 – ‘safety boundary’;
3 – wind direction

Выброс опасного агента до этой границы – не приведет к серьезному загрязнению воздуха в точке «интереса». Под точкой интереса будем понимать объект, на который направлена атака террориста (развлекательные центры, административные здания и т.д.). Кроме этого, мы должны принимать во внимание, что при теракте с применением химического (биологического) агента важнейшим параметром является время: у людей, в зоне атаки должно быть *время* на укрытие.

Формализуем выше сказанное: координаты места атаки (место выброса опасного агента) обозначим через $r_0 = (x_0, y_0)$, рис.1. Координаты объекта атаки (точки «интереса») обозначим через $r_i = (x_i, y_i)$. До момента времени τ концентрация опасного вещества в точке «интереса» не должна превышать некоторого порогового значения φ . То есть:

$$C(r_i, \tau) < \varphi \quad (1).$$

Пороговое значение φ – это, например, концентрация, при которой наступает потеря

сознания человеком, удушье т.д. Время τ определяет «запас» времени у людей на эвакуацию.

Для решения задачи по оценке уровня загрязнения воздушной среды с применением химических (биологических) агентов, а значит для определения положения пояса безопасности, можно использовать аналитические или численные модели [3, 5, 8]. Но применение таких моделей для решения поставленной задачи требует проведения десятков расчетов, в ходе которых варьируются координаты возможного места выброса опасного вещества x_0, y_0 , поскольку эти координаты – неизвестны (неизвестно место атаки террориста). То есть, задача решается перебором различных вариантов места выброса при теракте. При этом необходимо учитывать характерные для региона метеоусловия. Применение такого подхода требует много времени на получение требуемого результата. В этой связи, актуальной проблемой является разработка эффективных методов решения задач по определению границы пояса безопасности при возможных терактах.

Цель

Целью данной работы является разработка 2D численной модели для определения границ пояса безопасности в случае возможных терактов с применением химических (биологических) агентов.

Методика

Разработку математической модели для оценки уровня загрязнения атмосферы при теракте будем проводить для двухмерного случая. В общем случае, прогноз загрязнения атмосферы при теракте с применением химического (биологического) агента основывается на решении уравнения переноса загрязняющего вещества в атмосфере [2, 3, 5, 7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + Q\delta(x - x_0)\delta(y - y_0), \quad (2) \end{aligned}$$

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТІ

где C – концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе; σ – коэффициент, учитывающий распад агента в атмосфере; u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса агента при теракте; $\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)$ – дельта-функция Дирака; x_0, y_0 – координаты источника эмиссии агента при теракте; t – время.

Следует отметить, что масса опасного вещества – также заранее неизвестна, но можно предположить, что она *не будет* превосходить некоторой величины M_{\max} , соответствующей той массе, которую можно максимально близко и «незаметно» доставить к объекту атаки. Будем полагать, что выброс опасного вещества при теракте происходит очень быстро, поэтому в математической модели принимаем, что выброс – мгновенный.

Краевые условия для уравнения (2) записываются так [3]:

$$\tilde{N} = \tilde{N}_0 \quad \text{при } t = 0,$$

$C = 0$ на границах расчетной области, где C_0 – известная величина

При решении прогнозных задач (определение размеров зон заражения, их изменение с течением времени, определение времени подхода облака токсичного вещества к точке «интереса» и т.д.) необходимо задать информацию о точке выброса, т.е. координаты x_0, y_0 . Решение прогнозных задач на базе уравнения (2) называется решением прямой задачи массопереноса.

Однако, как уже отмечалось, координаты возможного места выброса опасного вещества неизвестны до совершения теракта. Поэтому для определения границы пояса безопасности необходимо провести серию расчетов на базе уравнения (2), чтобы путем перебора различных вариантов места эмиссии опасного вещества (т.е. путем перебора значений x_0, y_0) найти границу пояса безопасности.

В данной работе используем другой подход для определения границы пояса безопасности. Этот подход основывается на идее Г. И. Марчука применения сопряженного уравнения (3) [3]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} + \sigma C^* = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \end{aligned} \quad (3)$$

где C^* – функция, сопряженная с функцией C , p – некоторая функция [3].

Краевые условия для сопряженной задачи имеют вид [3]:

$C^* = C_T^*$ – концентрация химического агента в атмосферном воздухе при $t=T$; $C^* = 0$ – на границах расчетной области.

Вид функции p – может быть крайне разнообразным [3]. В данной работе вид функции p будет следующим:

$$p(x, y, t) = \delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(t-\tau) \quad (4)$$

Если решение сопряженного уравнения (2) найдено, то, далее, необходимо найти значение функционала следующего вида [3]

$$I = Q \int_0^T C^*(r_0, t) dt, \quad (5)$$

Построив изолинии этого функционала мы находим решение поставленной задачи из условия

$$I(r_0, \tau) < \varphi \quad (6)$$

Для решения сопряженной задачи (3), введем новые переменные [3]:

$$u' = -u, \quad v' = -v, \quad t' = T - t.$$

Решение сопряженной задачи начинается с момента времени $t=T$.

При использовании новых переменных, уравнение (3) принимает вид уравнения (2). Далее, проведем аппроксимацию производных, следуя [2, 5]. Аппроксимация производной по времени осуществляется так:

$$\frac{\partial \tilde{N}^*}{\partial t'} \approx \frac{C_{ij}^{*n+1} - C_{ij}^{*n}}{\Delta t'}$$

Далее, в формулах, символы «*», «'» будем опускать.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Первые производные аппроксимируются соотношениями [5]

$$\frac{\partial u \tilde{N}}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

где $u^+ = \frac{u+|u|}{2}$, $u^- = \frac{u-|u|}{2}$, $v^+ = \frac{v+|v|}{2}$, $v^- = \frac{v-|v|}{2}$.

Для аппроксимации первых производных используем формулы [2, 5]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Аппроксимация вторых производных осуществляется так [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \end{aligned}$$

С учетом приведенных обозначений разностных операторов записываем разностный аналог уравнения (2):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + \\ + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + \\ + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + Q_{ij} \delta_{ij}. \quad (7) \end{aligned}$$

Теперь проведем расщепление разностного уравнения (7). Уравнения расщепления на каждом шаге записываются так:

на первом шаге ($k = \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n), \quad (8) \end{aligned}$$

на втором шаге ($k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c), \quad (9) \end{aligned}$$

на третьем шаге ($k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$):

применяется зависимость (9);

на четвертом шаге ($k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$):

применяется зависимость (8).

Искомое значение функции C на каждом дробном шаге определяется по формуле «бегущего счета». На последнем расчетном шаге имеем уравнение

$$\frac{\partial C^*}{\partial t} = p.$$

Для решения данного уравнения применяется метод Эйлера.

Для программной реализации построенной численной модели использовался FORTRAN.

Результаты

Разработанный код был использован для решения модельной задачи. Рассматривался выброс хлора. Ставится задача определить положение границы пояса безопасности возле объекта возможной атаки (рис.1) для двух моментов времени $\tau = 3$ и $\tau = 5$ (время безразмерное). В обоих случаях концентрация опасного вещества для каждого момента времени не

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

должна превышать пороговое значение $\varphi = 22$ возле объекта атаки (концентрация безразмерная). Характерное направление скорости ветра показано стрелкой на приводимых ниже рисунках. На этих рисунках представлены линии функционала (4), определенные после решения сопряженного уравнения (3).



Рис. 2. Изолинии функционала (4) для момента времени $\tau = 3$ (время безразмерное)

Fig. 2. Isolines of functional (4) for the time moment $\tau = 3$ (time is dimensionless)

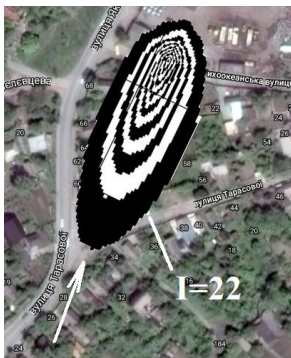


Рис. 3. Изолинии функционала (4) для момента времени $\tau = 5$ (время безразмерное)

Fig. 3. Isolines of functional (4) for the time moment $\tau = 5$ (time is dimensionless)

Размещение источника эмиссии вдоль линии $I = const$, приведет к одинаковому воздействию на уровень загрязнения атмосферы в точке «интереса». На границе пояса безопасности должны быть приняты все

меры, не позволяющие террористу ее пересечь и осуществить эмиссию опасного вещества. Как уже отмечалось выше, если эмиссия опасного вещества произойдет до границы пояса безопасности (рис.2, 3), то уровень загрязнения на объекте атаки не превысит заданного порогового значения концентрации для выбранных моментов времени τ . Иными словами, риск поражения людей в точке «интереса» будет минимальным.

Отметим, что время расчета положения границы пояса безопасности составляет 2 сек.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, позволяющая определить границы пояса безопасности возле объекта возможной атаки террориста, применяющего химический (биологический) агент.

Особенностью построенной модели является использование сопряженного уравнения для решения задачи и быстрота расчета.

Выводы

Предложена численная модель для определения границы пояса безопасности на базе решения сопряженной задачи в области загрязнения атмосферного воздуха при мгновенной эмиссии опасных веществ. Построенная модель может применяться при разработке стратегии минимизации последствий терактов с применением химических (биологических) агентов. Для решения сопряженного уравнения используется неявная разностная схема расщепления. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении разработки численной модели, позволяющей определять границы пояса безопасности с учетом влияния застройки на формирование зон загрязнения при теракте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Barret, A. M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret ; Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.01.2018.
10. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / Aleksandr Tumanov, Vasily Gumenyuk, Vladimir Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017 – Vol. 90. – P. 1-11. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, Naser Moharram Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communication. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain / Cejun Cao, Congdong Li, Qin Yang, Fanshun Zhang // Sustainability MDPI, Open Access Journal. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. – P. 2103. doi:10.3390/su9112103
13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Електронний ресурс] / Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с экрана. – Проверено : 14.06.2018.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection. – 2015. – № 2. – P. 1–9.

М. М. БЛЯЄВ^{1*}, І. В. КАЛАШНИКОВ^{2*}, В. А. КОЗАЧИНА^{3*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Конарева, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПОЯСУ БЕЗПЕКИ ПРИ ТЕРАКТАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНИХ АГЕНТІВ

Мета. Робота передбачає розробку 2D чисельної моделі для розрахунку «поясу безпеки» в разі терористичного нападу із використанням хімічного агента. Пояс безпеки є кордоном, за яким емісія небезпечної речовини під час теракту призведе до небажаних наслідків на місці розташування об'єкта атаки. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання використовується рівняння, поєднане з рівнянням масо-переносу в атмосферному повітрі хімічного агента, викинутого в разі теракту. При моделюванні враховується поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду небезпечної речовини. Для

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

чисельного інтегрування моделюючого сполученого рівняння вводяться нові змінні та застосовується невяна різницева схема розщеплення. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оперативної оцінки стану пояса безпеки біля можливого об'єкта атаки. **Результати.** Розроблена чисельна модель і комп'ютерна програма можуть бути використані для науково обгрунтованої оцінки стану пояса безпеки біля значущих об'єктів у разі можливих терактів із застосуванням хімічних (біологічних) агентів. Побудована чисельна модель може бути реалізована на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє широко використовувати її для вирішення завдань даного класу при розробці плану ліквідації аварійної ситуації. Представлені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості запропонованого методу розрахунку положення пояса безпеки в разі терористичного нападу із використанням хімічного агента. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективний метод розрахунку положення пояса безпеки біля об'єкта, який може бути метою терористичної атаки із застосуванням хімічно небезпечної речовини. Метод заснований на чисельному інтегруванні рівняння, що є зв'язаним до рівняння масопереносу хімічно небезпечних речовин в атмосферному повітрі. **Практична значимість.** Запропонований метод розрахунку положення пояса безпеки біля об'єкта, який може бути метою терористичної атаки із застосуванням хімічно небезпечної речовини, може бути використаний для організації захисних заходів, спрямованих на мінімізацію наслідків терактів.

Ключові слова: теракт; хімічне забруднення; спряжене рівняння; чисельне моделювання; забруднення атмосфери

M. M. BILIAIEV^{1*}, I. V. KALASHNIKOV^{2*}, V. A. KOZACHYNA^{3*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», Konarev St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

DEFINITION OF «SAFETY BOUNDARY» IN CASE OF TERRORIST ATTACK WITH CHEMICAL AGENTS

Purpose. The work involves the development of a 2D numerical model for calculating the «safety boundary» in the case of a terrorist attack using a chemical agent. The safety boundary is the boundary behind which the emission of a dangerous substance in a terrorist act will lead to undesirable consequences at the site of the attack object.

Methodology. To solve this problem, we used an equation conjugated with the equation of mass transfer in the atmospheric air of a chemical agent ejected in the case of a terrorist attack. The simulation takes into account the field of wind speed, atmospheric diffusion, the release intensity of a hazardous substance. For numerical integration of the modeling conjugated equation, new variables are introduced and an implicit difference splitting scheme is applied. A feature of the developed numerical model is the ability to quickly assess the position of the safety boundary near a possible object of attack. **Findings.** The developed numerical model and computer program can be used for a scientifically grounded assessment of the safety boundary position near significant objects in the event of possible terrorist attacks using chemical (biological) agents. The constructed numerical model can be implemented on computers of small and medium power, which makes it possible to widely use it to solve the problems of the considered class, when developing an emergency response plan. The results of a computational experiment are presented that allow one to evaluate the possibilities of the proposed method for calculating the position of the safety boundary in the case of a terrorist attack using a chemical agent. **Originality.** An effective method for calculating the position of the safety boundary near the facility, which may be the target of a terrorist attack using a chemically hazardous substance, is proposed. The method is based on the numerical integration of the equation, which is conjugated to the equation of mass transfer of chemically hazardous substances in the atmospheric air. **Practical value.** The proposed method for calculating the position of the safety boundary near the facility, which may be the target of a terrorist attack using a chemically hazardous substance, can be used to organize protective measures aimed at minimizing the consequences of terrorist attacks.

Ключевые слова: terrorist attack; chemical pollution; conjugated equation; numerical model; air pollution

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Marchuk G.I. Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p. (in Russian)
4. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, USA. (in English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress, 1(61)*, 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. *Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden*. (n.d.). Retrived from <http://www.era.europa.eu/DocumentRegister/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> (in English)
10. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 90*, 1-11. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, & Naser Moharram Nejad. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication, 10(1)*, 192-204. (in English)
12. Cao, C., Li, C., Yang, Q. & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability, 9(11)*, 2103. doi: 10.3390/su9112103 (in English)
13. Government of Alberta. Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrived from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, & Jan Bitta. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *Bezpečnostní výzkum. The Science for Population Protection, 2*, 1-9. (in English)

Поступила в редколлегию: 12.02.2018

Принята к печати: 30.05.18

УДК 66.04

О. П. КРОТ^{1*}, А. И. РОВЕНСКИЙ^{2*}, В. В. КОНЕВ^{3*}

^{1*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 30 08, эл. почта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2376-4981

^{2*}Отдел региональной экологии, Северо-восточный научный центр НАН и МОН Украины, ул. Багалия, 8, Харьков, Украина, 61000, тел. +38 (057) 706 30 42, эл. почта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0003-3803-2051

^{3*}Каф. «Строительные материалы, конструкции и сооружения», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61000, тел. +38 (067) 575 05 51, эл. почта ukrainoslav@ukr.net, ORCID 0000-0003-4215-5353

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Цель. Система управления твердыми отходами в Украине в основном сводится к захоронению их на полигонах. При этом отсутствует контроль над загрязнением окружающей среды, что в свою очередь приводит к экологическим рискам. На предприятиях железнодорожного транспорта образуется значительное количество твердых отходов. Поэтому основной целью работы должно стать решение проблемы ликвидации отходов, образовавшихся на крупных железнодорожных станциях и в процессе обслуживания поездов. **Методика.** Предлагается использовать мобильные подвижные мусороперерабатывающие установки, которые устраняют негативное влияние процесса накопления твердых промышленных и потребительских отходов на среду обитания человека. Эти установки могут обслуживать определенное количество производителей отходов. Данное исследование было проведено на мобильном мусороперерабатывающем комплексе МПК-300, расположенном на железнодорожном вокзале Харьков–Пассажирский Южной железной дороги. **Результаты.** Описана конструкция и назначение основных узлов мусороперерабатывающего комплекса. Зольный остаток после термического сжигания твердых отходов составляет 5–10 % от их первоначального объема и соответствует безопасному IV классу классификационного каталога отходов. Многоступенчатая термокаталитическая очистка отходящих газов обеспечивает концентрацию вредных веществ, в том числе диоксиновой группы, в пределах допустимых норм. Для полного сжигания всех компонентов отходов была определена температура в печи 850–900 °С, пребывание дымовых газов в камере дожигания при 1100–1200 °С – не менее двух секунд, коэффициент избытка воздуха – 1,4. **Научная новизна.** Авторами впервые было проведено исследование параметров сжигания отходов железнодорожного транспорта различного элементного состава. Рассчитан суммарный теоретический объем продуктов сгорания на мобильном мусороперерабатывающем комплексе. **Практическая значимость.** Применение мобильного мусороперерабатывающего комплекса позволяет решить проблему утилизации твердых бытовых отходов. Как показала практика, его эксплуатация обоснована и является не только экономически выгодной, но и экологически безопасной. Результаты работы позволяют оценить количество отходящих газов при различных морфологических составах отходов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы; мобильный мусороперерабатывающий комплекс; железнодорожный транспорт; отходящие газы; сжигание; материальный баланс

Введение

Комплекс организаций и предприятий железнодорожного транспорта предназначен для обеспечения потребностей общественного производства и населения страны в перевозках во внутреннем и международном сообщениях и предоставления других транспортных услуг всем потребителям без ограничений по признакам формы собственности и видов деятельности. Количе-

ство железнодорожных вокзалов на Украине составляет 106 единиц, а железнодорожных станций – 1447 единиц. Для функционирования этих объектов необходимо создание эффективной инфраструктуры управления отходами. Твердые бытовые отходы (ТБО), образующиеся на крупных железнодорожных станциях и при обслуживании пассажирских поездов, по всей стране составляют значительные объемы [1]. В научных исследованиях [9, 12] описывается процесс

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

накопления отходов на предприятиях железнодорожного транспорта по разным странам, приводится количественная оценка, анализ и система управления отходами. Автор [6] раскрывает долгосрочные перспективы эксплуатации небольших мусоросжигающих заводов. Анализ параметров сгорания смеси отходов пассажирских поездов и угля в трубчатой печи [10] доказывает возможность использования тепловых свойств отходов.

Существующая в Украине практика обращения с твердыми отходами основана преимущественно на захоронении на свалках или полигонах. Объем отходов с каждым годом увеличивается, а территориальные возможности для их утилизации и переработки уменьшаются. Для доставки отходов от мест их образования до пунктов утилизации необходимо все больше времени и средств.

Захоронение ТБО на полигонах требует регулярного открытия новых площадок, которые должны располагаться все дальше от центра города. Это приводит к дополнительным экономическим затратам, связанным с увеличением пробега мусоровозов, эмиссий в атмосферный воздух продуктов сгорания автомобильного топлива, дополнительной загрузкой и износом автодорог. В результате себестоимость традиционного захоронения становится достаточно высокой, особенно с учетом большой площади необходимых полигонов, выведенных из сельскохозяйственного оборота минимум на 100 лет, а также высокой стоимостью их обустройства. В настоящее время в Украине сортировка и использование отходов в качестве вторичного сырья составляет меньше 10 % от общего годового объема.

Сжигание отходов с рекуперацией тепловой энергии является альтернативой захоронению. В исследовании [5] проанализирован энергетический потенциал ТБО в городе Понта-Гросса, Парана, Бразилия. Для анализа были собраны образцы на муниципальном полигоне. Средняя валовая теплотворная способность составляет 19,8 МДж/кг по сравнению с отходами других городов мира. Оптимальный состав ТБО Сингапура из 42 % пластмассы, 41 % бумаги/картона, 7 % текстиля и 10 % садоводческих отходов имел низшую теплотворную способность 23,7 МДж/кг [13]. Это меньше, чем минеральное топливо, но выполняются требования к топливу, указанные в европейских стандартах.

Преимущества использования сжигания для обработки отходов – это сокращение объема отходов, возможность обрабатывать громоздкие отходы, одновременно уменьшая их объем в 10 раз и более. В процессе сжигания отходов устраняются опасные свойства горючих канцерогенов, патогенных организмов, токсичных органических соединений и биологически активных веществ. В зависимости от мощности мусоросжигающего завода, за счет производства тепловой и электрической энергии возможно обеспечение определенного количества потребителей теплом или электричеством. В работе [8] было проведено сравнение эффективности преобразования энергии для различных типов термических процессов – сжигание отходов с рекуперацией энергии, газификация отходов с извлечением энергии и пиролиз отходов с извлечением энергии. Исследовались ТБО с разным морфологическим составом. Было выяснено, что доминирующим типом термической обработки является сжигание, связанное с извлечением энергии в паровом цикле. В малогабаритных установках электрическая эффективность ограничена масштабным эффектом и остается на уровне около 20–24 %.

В работе [7] сформулированы критерии эффективности работы мусоросжигающей печи на примере вращающейся: длина участка, где достигается максимальная температура горения; длина участка с минимальной температурой перед разгрузкой шлака; температура шлака на выходе. Выбрана более эффективная конфигурация по всем критериям (со встречным движением отходов и газа).

Анализ экологического воздействия установок по сжиганию отходов в процессе их эксплуатации выполнялся в работах [3, 4]. Для этого были подробно изучены различные установки для сжигания, как недавно созданные, так и эксплуатируемые последнее десятилетие. Использование современных систем очистки выбросов доказывают свою эффективность для борьбы с загрязнением воздуха.

Цель

Основной целью работы является решение проблемы ликвидации отходов, образовавшихся на крупных железнодорожных станциях и в процессе обслуживания поездов. Также предполага-

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТІ

ется провести исследование продуктов сгорания ТБО, состоящих из бумажных и пластиковых компонентов, на мобильном мусороперерабатывающем комплексе. Отходы собирались на объектах железнодорожного транспорта.

Методика

Предлагается использовать мобильные подвижные мусороперерабатывающие установки, которые устраняют негативное влияние процесса накопления твердых промышленных и потребительских отходов на среду обитания человека. Исследование было проведено на одной из таких установок, эксплуатируемых на Южной железной дороге.

Для проведения исследования было собрано несколько компонентов отходов, условно разделенных на две основные группы: бумага и пластик. К первой группе относятся отходы, в состав которых входит древесина, картон, бумага, опавшие листья (сезонно) и т. под. Вторая группа содержит отходы, состоящие из пластика в виде обрывков полиэтиленовой пленки, одноразовой посуды и т. д. Муниципальные отходы очень сложны и трудны в освоении из-за неоднородности их состава, могут содержать десятки различных веществ. На состав отходов влияет несколько факторов, а именно: время года, климат, образ жизни населения, демографический показатель и действующее законодательство. Независимо от места образования и разнообразия компонентов, ТБО состоят из таких частей: органиче-

ской, неорганической и физической (воды). Влажность отходов, в зависимости от условий образования, сбора и хранения, может изменяться от 5 до 60 %. Органическая часть отходов – это альтернативное топливо, которое состоит на 31–52 % из углерода, 16–40 % – из кислорода и других соединений.

Зная морфологический состав отходов, можно рассчитать их теплотворную способность, расход воздуха во время горения, количественный и качественный состав отходящих газов и адиабатическую температуру горения.

Результаты

На железнодорожном вокзале Харьков–Пассажирский введен в эксплуатацию мобильный мусороперерабатывающий комплекс МПК-300 для переработки отходов прибывающих на вокзал поездов и подразделений вокзала. После ввода этого комплекса в эксплуатацию службы вокзала отказались от накопления и вывоза поступающих отходов на полигон. Как показала практика, такие мероприятия оказались целиком обоснованными и являются не только экономически выгодными, но и экологически безопасными. На рис. 1 представлен общий вид комплекса МПК-300 производительностью 300 кг/час, размещенного на железнодорожной платформе. Он предназначен для приема, сортировки и термokatалитического сжигания твердых и жидких отходов.

Комплекс состоит из отделения сортировки с отбором коммерческой части ТБО.

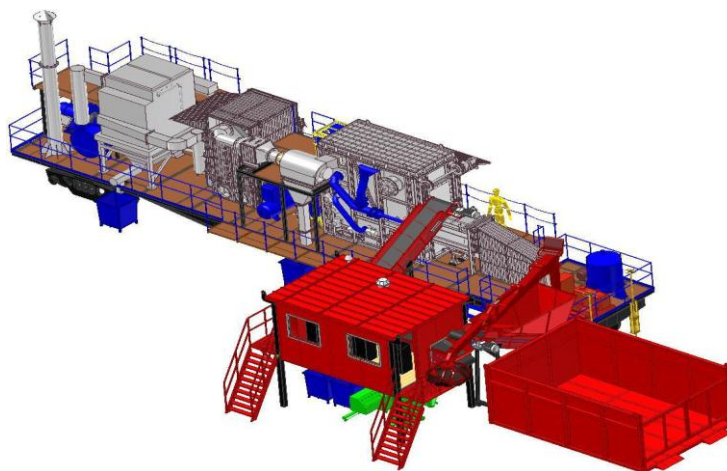


Рис. 1. Общий вид мобильного мусороперерабатывающего комплекса МПК-300

Fig. 1. General view of mobile waste-processing complex WPC-300

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Приемно-сортировочная линия предназначена для приема ТБО, дозированной подачи на сортировку, отбора стекла, металла и подачи остатков ТБО на термическое уничтожение. Отделение термохимического обезвреживания отходов состоит из многоступенчатой системы газоочистки, которая позволяет снизить концентрации вредных веществ до нормативов, действующих в странах Европейского Союза и Украины.

Технология термохимического обезвреживания ТБО, реализованная в составе комплекса, включает ряд последовательных операций:

- бездымная загрузка ТБО в топочную камеру печи;
- сжигание ТБО в рабочем пространстве печи и термическое окисление продуктов сгорания;
- дожигание тяжелых углеводородов и оксида углерода происходит в камере дожигания;
- обезвреживание высокотоксичных органических веществ продуктов сгорания, включая бензпирен, диоксины, фураны и др., происходит в двух последовательно установленных каталитических реакторах;

– предочистка дымовых газов в центробежно-вихревом пылеуловителе;

– очистка продуктов сгорания от кислых неорганических соединений в отводимых газах производится за счет подачи в газоотводящий тракт 10-процентного щелочного раствора;

– осаждение в тканевом фильтре механических загрязнений, включая соединения тяжелых металлов и остаточное количество сажи;

– улавливание соединений тяжелых металлов осуществляется путем адсорбирования их в углетканевом фильтре;

– транспортировка дымовых газов по газоотводящему тракту выполняется дымососной установкой.

Комплексы такого типа обеспечивают соблюдение экологических нормативов при максимальном использовании сырьевой и энергетической ценности ТБО с минимальными приведенными затратами, сокращают расходы на утилизацию, нагрузку на полигоны на 90 % и снижают опасность отходов до IV класса опасности [11]. Технические характеристики комплекса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики установки по сжиганию отходов предприятий железнодорожного транспорта

Table 1

Technical characteristics of the waste incineration plant of railway transport enterprises

Наименование показателя	Значение
Производительность комплекса, кг/час	300
Количество отбираемого вторсырья, кг/час	100
в том числе:	
– пластик и ПЭТ-тара;	25
– стекло;	20
– бумага, картон;	45
– черный и цветной металл.	10
Количество отходов, подаваемых на термокаталитическое обезвреживание, кг/час	200
Общая установленная мощность электроприводов комплекса, кВт	90
Объем дымовых газов, сбрасываемых в атмосферу, м ³ /час, не более	5000
Концентрация пыли в дымовых газах на выходе, мг/м ³ , не более	100
Концентрация загрязняющих веществ в приземном слое, рабочей площадке, доли ПДК, не более	0,1

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ТБО сжигаются в камерной печи представленной установки. Печь футерована и оборудована эжекционной форсункой и подводом горячих дутьевых газов в подколосниковое пространство и на форсунку. Температура в камере сжигания поддерживается в пределах 850–1000 °С. Загрузочное устройство периодически подает ТБО на колосниковую решетку, под которую для обеспечения горения подводится горячий воздух из рекуператора. После достижения рабочей температуры в печи (около 900 °С), что обеспечивает сжигание органических соединений, подача топлива в горелку прекращается, и процесс сжигания осуществляется только за счет тепла горения ТБО. Выходящие из печи газы после камеры дожига проходят сквозь рекуператор и подогревают в нем воздух для горения, который нагнетается в печь вентилятором.

Весомой характеристикой отходов является их теплотворная способность. ТБО можно отнести к низкокалорийному топливу. Если рассматривать отдельные составляющие отходов, то теплота сгорания пластмассы может составлять 43,7 МДж/кг. Тепловая ценность отходов прямо пропорциональна содержанию углерода в отходах и обратно пропорциональна зольности и содержанию влаги. Теплотворную способность отходов традиционно рассчитывают по эмпирической формуле Менделеева:

$$Q_p^H = 4,18 \cdot (81C_p + 300H_p - 26(O_p - S_p) - 6(9H_p + W_p)), \quad (1)$$

где Q_p^H – низшая теплота сгорания ТБО на рабочую массу, кДж/кг; C_p – общее содержание углерода, мас. %; H_p – общее содержание водорода, мас. %; O_p – общее содержание кислорода, мас. %; S_p – общее содержание серы, мас. %; W_p – общая влажность, мас. %.

Высшая теплота сгорания ТБО может быть рассчитана по формуле:

$$Q_p^B = Q_p^H + 25(9H_p + W_p). \quad (2)$$

В процессе сжигания отходов мобильный мусороперерабатывающий комплекс выделяет тепло, которое используется для подсушивания ТБО с высокой влажностью. Например, при подсушивании бумажной составляющей отходов с 60 до 25 % низшая теплота сгорания этих

компонентов повышается с 6 476,832 кДж/кг до 12 426,48 кДж/кг. Система подсушки позволяет повысить теплоту сгорания топлива и уменьшить подачу дополнительного топлива на поддержание горения.

Элементный состав ТБО определяется, исходя из его морфологического состава, по формулам:

$$C_{p_{sum}} = C_{p_1} \cdot I_1 + C_{p_2} \cdot I_2 + \dots + C_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (3)$$

$$H_{p_{sum}} = H_{p_1} \cdot I_1 + H_{p_2} \cdot I_2 + \dots + H_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (4)$$

$$O_{p_{sum}} = O_{p_1} \cdot I_1 + O_{p_2} \cdot I_2 + \dots + O_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (5)$$

$$N_{p_{sum}} = N_{p_1} \cdot I_1 + N_{p_2} \cdot I_2 + \dots + N_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (6)$$

$$S_{p_{sum}} = S_{p_1} \cdot I_1 + S_{p_2} \cdot I_2 + \dots + S_{p_{pn}} \cdot I_{pn}, \quad (7)$$

где $C_{p_1}, C_{p_2}, \dots, C_{p_n}$ – содержание углерода в каждом компоненте ТБО, % (аналогично и по другим элементам); $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ – доли соответствующих компонентов в общей массе ТБО, сумма которых равна 1; p – указатель рабочей массы ТБО; n – порядковый номер компонента [2].

Содержание влаги в рабочей массе каждого компонента отхода определяется по формуле:

$$W_{p_{sum}} = W_{p_1} \cdot I_1 + W_{p_2} \cdot I_2 + \dots + W_{p_{pn}} \cdot I_{pn}. \quad (8)$$

Содержание золы в рабочей массе каждого компонента отхода можно определить по формуле:

$$A_{p_{sum}} = A_{p_1} \cdot I_1 + A_{p_2} \cdot I_2 + \dots + A_{p_{pn}} \cdot I_{pn}, \quad (9)$$

где A_p – содержание золы, %.

Необходимо отметить, влага снижает качество топлива, а именно уменьшает теплоту его сгорания и затрудняет воспламенение. Зола также снижает качество топлива и препятствует полному его сгоранию, образуя на поверхности несгоревших частей отходов воздухонепроницаемый слой.

Различают теоретическую (калориметрическую) и практическую (действительную) температуры горения отходов. Калориметрическая температура – это температура, которую приобретают продукты сгорания при условии, что вся теплота, выделенная при полном сгора-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

нии единицы топлива, пошла на нагрев только продуктов сгорания. Ее определяют из уравне-

ния теплового баланса, в нашем случае она равна, °С:

$$t_{kal} = \frac{Q_H^p + I_T + I_{возд}}{V_{RO_2}^o \cdot c_{RO_2} + V_{N_2}^o \cdot c_{N_2} + V_{H_2O}^o \cdot c_{H_2O} + (\alpha - 1)V_{возд}^o \cdot c_{возд}}, \quad (10)$$

где Q_H^p – низшая теплота сгорания рабочей массы отходов; c_{RO_2} , c_{N_2} , c_{H_2O} , $c_{возд}$ – удельные теплоемкости продуктов сгорания, соответственно двухатомных газов, азота, воды и воздуха, кДж/(кг·К); I_T – энтальпия топлива, кДж/кг, рассчитывается по формуле: $I_T = c_T \cdot t_T$; $I_{возд}$ – энтальпия воздуха, кДж/кг, рассчитывается по формуле: $I_{возд} = V_{возд}^o \cdot \alpha \cdot c_{возд} \cdot t_{возд}$.

Действительная температура сгорания, °С:

$$t_d = t_{kal} \left(1 - \frac{q_{ном.вОС}}{100}\right) (1 - \sigma), \quad (11)$$

где $q_{ном.вОС}$ – коэффициент, учитывающий потери в окружающую среду, %; σ – коэффициент, который учитывает прямую отдачу (коэффициент долевого излучения газов), равен 0,15.

Количество теоретически необходимого воздуха для полного сгорания 1 кг отходов рассчитывалось по формуле:

$$V_{возд}^o = 0,088Cp_{sum} + 0,265Hp_{sum} + 0,033Sp_{sum} - 0,033Op_{sum}. \quad (12)$$

Теоретический объем азота рассчитывался по формуле, м³/кг:

$$V_{N_2}^o = 0,79V_{возд}^o, \quad (13)$$

Теоретический объем трехатомных газов, м³/кг:

$$V_{RO_2}^o = 1,866Cp_{sum} / 100, \quad (14)$$

Теоретический объем водяного пара, м³/кг:

$$V_{H_2O}^o = 0,111Hp_{sum} + 0,0124Ap_{sum} + 0,0161V_{возд}^o. \quad (15)$$

Суммарный теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг:

$$V_{газов}^o = V_{N_2}^o + V_{RO_2}^o + V_{H_2O}^o. \quad (16)$$

Полученные результаты расчета теоретического объема продуктов сгорания приведены в табл. 2. Проведенные исследования показывают, что ТБО пассажирских поездов и вокзала в основном состоят из бумаги и пластика, доля содержания серы в этих отходах меньше 0,01. Элементный состав первой группы отходов, содержащих древесину, картон, бумагу, опавшие листья (сезонно): 44 % углерода, 6,2 % водорода, 49,4 % кислорода.

Таблица 2

Результаты расчета теоретического объема продуктов сгорания

Table 2

The results of calculating the theoretical volume of combustion products

Теоретические объемы, м ³ /кг	Соотношение долей картона и пластика		
	0,5/0,5	0,6/0,4	0,7/0,3
V° воздуха	6,65	5,81	4,96
V° RO ₂	1,01	0,91	0,80
V° H ₂ O	1,334	1,26	1,18
V° азота	5,26	4,59	3,92
V° газов	7,60	6,75	5,91

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Q_p^H складає 16 572,82 кДж/кг при нульовій вологості.

Елементний склад другої групи відходів із пластику в формі обривків поліетиленової плівки, одноразової посуду та інших полімерів – це 84 % вуглецю, 14 % водню та 2 % кисню.

Q_p^H складає 43932 кДж/кг при нульовій вологості.

Таким чином, система використання теплового енергії, що утворюється після згорання відходів для підсушування перед подачею в печі, має велике значення для економії додаткового палива.

Научная новизна и практическая значимость

Авторами вперше було проведено дослідження параметрів згорання відходів залізничного транспорту різного складу. Розраховано сумарний теоретичний об'єм продуктів згорання на мобільному мусоропереробному комплексі. Як показала прак-

тика, його експлуатація обґрунтована та є не тільки економічно вигідною, а й екологічно безпечною. Результати роботи дозволяють оцінити кількість відходів газів при різних морфологічних складів відходів залізничного транспорту.

Выводы

Згорання муніципальних відходів повинно відповідати наступним критеріям:

1. Температура згорання в газовій фазі – не менше 850 °С. Час перебування димових газів в зоні згорання не менше двох секунд.

2. Коефіцієнт надлишку повітря – 1,4, що забезпечить мінімізацію корозії та повне згорання. Вміст вуглецю в димових газах є ключовим показником якості згорання.

3. Димові гази, що утворюються в мусоропалачних печах, повинні оброблятися за допомогою високоєфективної системи очищення димових газів.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Безовська, М. С. Управління поведінкою з відходами вагонних пасажирських депо на Придніпровській залізниці / М. С. Безовська, В. М. Плахотник, А. Х. Дабкіна // Вісник Кременч. держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2007. – Вип. 1 (42), ч. 1. – С. 115–118.
2. Крот, О. П. Моделювання установок з обертовою печю для термічного обезвреження відходів / О. П. Крот, А. І. Ровенський // Проблеми регіональної енергетики. – 2018. – № 1 (36). – С. 44–57. doi: 10.5281/zenodo.1217255
3. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание) : справочник / В. Г. Систер, А. Н. Мирный, Л. С. Скворцов, Н. Ф. Абрамов, Х. Н. Никогосов. – Москва : АКХ им. К. Д. Панфилова, 2001. – 319 с.
4. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value / L. Zhao, A. Giannis, W.-Y. Lam, S.-X. Lin, K. Yin, G.-A. Yuan, J.-Y. Wang // Sustainable Environment Research. – 2016. – Vol. 26. – Iss. 1. – P. 51–54. doi: 10.1016/j.serj.2015.09.003
5. Combustion characteristics of coal and refuse from passenger trains / Ren Fu-min, Yue Feng, Gao Ming, Yu Min // Waste Management. – 2010. – Vol. 30. – Iss. 7. – P. 1196–1205. doi: 10.1016/j.wasman.2009.12.023
6. Decentralized Waste Management in Indian Railways: A Preliminary Analysis / M. Sharma, R. Kumar Sugam, K. Neog, A. Ramji. – New Delhi : Council on Energy, Environment and Water, 2016. – 26 p.
7. Kong, W. M. Implementation of Incineration for Efficient Waste Reduction / W. M. Kong // 2015 International Conference on Advances in Environment Research. – 2015. – Vol. 87. – P. 77–80.
8. Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration / A. Damgaard, C. Riber, T. Fruergaard, T. Hulgaard, T. H. Christensen // Waste Management. – 2010. – Vol. 30. – Iss. 7. – P. 1244–1250. doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.025
9. Lombardi, L. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste / L. Lombardi, E. Carnevale, A. Corti // Waste Management. – 2015. – Vol. 37. – P. 26–44. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.010

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

10. Mobile thermocatalytic waste processing complex / L. L. Tovazhnyanskyu, V. E. Ved, V. A. Koshchii, A. I. Rovenskii, E. V. Krasnokutskii // Chemical Engineering Transaction. – 2013. – Vol. 35, pt. 2. – P. 907–912.
11. Nguyen, Th. H. A. Management of organic solid waste from rail operation by the Vietnam railways: the current situation and possible solutions / Thi Hoai An Nguyen // Journal of Vietnamese Environment. – 2012. – Vol. 3, No. 1. – P. 34–37.
12. Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil (Energy potential of household solid waste (HSW) in the city of Ponta Grossa, Paraná, Brazil) / S. Gomes, P. H. W. Neto, D. Agostinho da Silva, S. R. Masetto Antunes, C. Hugo Rocha // Engenharia Sanitaria e Ambiental. – 2017. – Vol. 22. – Iss. 6. – P. 1197–1202. doi: 10.1590/S1413-41522017143432
13. Termovalorizzatori: analisi e confronto tra nuove tecnologie, impatti e strategie di mitigazione (Thermovalorization: new technologies, impacts and mitigation strategies) / M. Buffoli, S. Capolongo, V. L. Loconte, C. Signorelli // Annali di igiene: medicina preventiva e di comunità. – 2012. – Vol. 24 (2). – P. 167–178.

О. П. КРОТ^{1*}, О. І. РОВЕНСЬКИЙ^{2*}, В. В. КОНЄВ^{3*}

^{1*}Каф. «Безпека життєдіяльності та інженерна екологія», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 30 08, ел. пошта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2376-4981

^{2*}Відділ регіональної екології, Північно-східний науковий центр Національної академії наук України, вул. Багалия, 8, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (057) 706 30 42, ел. пошта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0003-3803-2051

^{3*}Каф. «Будівельні матеріали, конструкції та споруди», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (067) 575 05 51, ел. пошта ukrainoslav@ukr.net, ORCID 0000-0003-4215-5353

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Мета. Система управління твердими відходами в Україні в основному зводиться до захоронення їх на полігоні. При цьому відсутній контроль за забрудненням навколишнього середовища, що в свою чергу призводить до екологічних ризиків. На підприємствах залізничного транспорту утворюється значна кількість твердих відходів. Тому основною метою роботи має стати вирішення проблеми ліквідації відходів, що утворилися на великих залізничних станціях та в процесі обслуговування поїздів. **Методика.** Пропонується використовувати мобільні рухливі сміттєпереробні установки, які усувають негативний вплив процесу накопичення твердих промислових і споживчих відходів на середовище проживання людини. Ці установки можуть обслуговувати певну кількість виробників відходів. Дане дослідження було проведено на мобільному сміттєпереробному комплексі МПК-300, розташованому на залізничному вокзалі Харків–Пасажирський Південної залізниці. **Результати.** Описана конструкція й призначення основних вузлів сміттєпереробного комплексу. Зольний залишок після термічного спалювання твердих відходів становить 5–10 % від їх початкового об'єму і відповідає безпечному IV класу класифікаційного каталогу відходів. Багатоступеневе термокаталітичне очищення газів, що відходять, забезпечує концентрацію шкідливих речовин, в тому числі діоксинової групи, в межах допустимих норм. Для повного спалювання всіх компонентів відходів була визначена температура в печі 850–900 °С, перебування димових газів у камері допалювання при 1100–1200 °С – не менше двох секунд, коефіцієнт надлишку повітря – 1,4. **Наукова новизна.** Авторами вперше було проведено дослідження параметрів спалювання відходів залізничного транспорту різного елементного складу. Розрахований сумарний теоретичний об'єм продуктів згоряння на мобільному сміттєпереробному комплексі. **Практична значимість.** Застосування мобільного сміттєпереробного комплексу дозволяє вирішити проблему утилізації твердих побутових відходів. Як показала практика, його експлуатація обґрунтована та є не тільки економічно вигідною, а й екологічно безпечною. Результати роботи дозволяють оцінити кількість газів, що відходять, при різних морфологічних складах відходів залізничного транспорту.

Ключові слова: тверді побутові відходи; мобільний сміттєпереробний комплекс; залізничний транспорт; відхідні гази; спалювання; матеріальний баланс

O. P. KROT^{1*}, O. I. ROVENSKYI^{2*}, V. V. KONIEV^{3*}

^{1*}Dep. «Safety Life and Environmental Engineering», Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 30 08, e-mail uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2376-4981

^{2*}Department of the Regional Ecology, North-East Scientific Centre of the National Academy of Sciences of Ukraine, Bahalii St., 8, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (057) 706 30 42, e-mail uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0003-3803-2051

^{3*}Dep. «Building Materials, Structures and Constructions», Ukrainian State University of Railway Transport, Feiervakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (067) 575 05 51, e-mail ukrainoslav@ukr.net, ORCID 0000-0003-4215-5353

THERMAL TREATMENT OF SOLID WASTE GENERATED BY RAILWAY TRANSPORT

Purpose. The solid waste management system in Ukraine consists from the land disposal of waste. In this case, there is no control over environmental pollution, which in turn leads to environmental risks. A considerable amount of solid waste is formed at the railway transport enterprises. The solution of the problem of the elimination of wastes generated at large railway stations and in the process of servicing trains, namely directly at the place of their formation, is considered in this work. **Methodology.** The authors propose to use mobile waste processing plants, which eliminate the negative impact of the process of accumulation of solid industrial and municipal waste on the human habitat; while they can serve a certain number of waste producers. The study was conducted on a waste processing plant (WPP-300) located in Kharkiv on the Southern Railway. **Findings.** The design and purpose of the main units of waste processing plant are described. The bottom ash after incineration of solid waste accounts for 5-10 % of the initial volume of waste and corresponds to the safe IVth class of the waste classification catalog. Multi-stage thermal catalytic cleaning of waste gases provides concentration of harmful substances, including dioxin group within the limits of permissible norms. For complete combustion of all components of the waste, the temperature in the furnace was 850-900 °C, the presence of flue gases in the afterburner at 1100-1200 °C for at least two seconds, the defined excess air 1.4. **Originality.** The authors for the first time conducted a study of the parameters of incineration of various elemental wastes. We calculated the total theoretical volume of combustion products on a mobile waste-processing complex. **Practical value.** The use of a mobile incineration plant allows solving the problem of solid domestic waste disposal. As shown by the practice of its operation, such measures are justified and are not only economically viable, but also environmentally friendly. The results of the work allow estimating the amount of waste gases at various morphological compositions of the waste of the railway transport.

Keywords: municipal solid waste; mobile waste recycling complex; railway transport; waste gases; incineration; material balance

REFERENCES

1. Bezovska, M. S., Plakhotnyk, V. M., & Drabkina, A. K. (2007). Upravlinnia povodzhennia z vidkhodamy vahonnykh pasazhyrskykh depo na Prydniprovskii zaliznytsi. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 1(42), 1, 115-118. (in Ukrainian)
2. Krot, O. P., & Rovenskyi, O. I. (2018). Modeling of Installations with a Rotary Kiln for Thermal Decontamination of Wastes. *Problemele energeticii regionale*, 1(36), 44-57. doi: 10.5281/zenodo.1217255 (in Russian)
3. Sister, V. G., Mirnyy, A. N., Skvortsov, L. S., Abramov, N. F., & Nikogosov, K. N. (2001). *Tverdyye bytovyye otkhody (sbor, transport i obezvrezhivaniye): Spravochnik*. Moscow: Akademiya kommunalnogo khozyaystva imeni K. D. Panfilova. (in Russian)
4. Zhao, L., Giannis, A., Lam, W.-Y., Lin, S.-X., Yin, K., Yuan, G.-A., & Wang, J.-Y. (2016). Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. *Sustainable Environment Research*, 1(26), 51-54. doi:10.1016/j.serj.2015.09.003 (in English)
5. Fu-min, R., Feng, Y., Ming, G., & Min, Y. (2010). Combustion characteristics of coal and refuse from passenger trains. *Waste Management*, 30(7), 1196-1205. doi: org/10.1016/j.wasman.2009.12.023 (in English)
6. Sharma, M., Neog, K., Sugam, R. K., & Ramji, A. (2016). Decentralised Waste Management in Indian Railways: A Preliminary Analysis. *Council on Energy, Environment and Water*, 26. Retrieved from <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/Decentralised%20Waste%20Management%20in%20India%20Railways.pdf> (in English)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

7. Kong, W. M. (2015). Implementation of Incineration for Efficient Waste Reduction. *International Conference on Advances in Environment Research*, 87, 77-80. (in English)
8. Damgaard, A., Riber, C., Fruerqaard, T., Hulqaard, T., & Christensen, T. H. (2010). Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. *Waste Management*, 30(7), 1244-1250. doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.025 (in English)
9. Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, 37, 26-44. doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010 (in English)
10. Tovazhnyansky, L. L., Ved, V. E., Koshchii, V. A., Rovenskii, A. I., & Krasnokutskii, E. V. (2013). Mobile thermocatalytic waste processing complex. *Chemical Engineering Transaction*, 35(2), 907-912. (in English)
11. Nguyen, T. H. A. (2012). Management of organic solid waste from rail operation by the Vietnam railways: the current situation and possible solutions. *Journal of Vietnamese Environment*, 3(1), 34-37. (in English)
12. Gomes, S., Neto, P. H. W., Silva, D. A., Antunes, S. R. M., & Rocha, C. H. (2017) Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil (Energy potential of household solid waste (HSW) in the city of Ponta Grossa, Paraná, Brazil). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(6), 1197-1202. doi:10.1590/S1413-41522017143432 (in Portugal)
13. Buffoli, M., Capolongo, S., Loconte, V. L., & Signorelli, C. (2012). Termovalorizzatori: analisi e confronto tra nuove tecnologie, impatti e strategie di mitigazione (Thermovalorization: new technologies, impacts and mitigation strategies). *Annali di igiene: medicina preventiva e di comunità*, 24(2), 167-178. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228111250_Thermovalorization_new_technologies_impacts_and_mitigation_strategies (in Italian)

Надійшла до редколегії: 04.04.2018

Прийнята до друку: 10.07.2018

UDC 656.2:504

A. V. SAMARSKA^{1*}, Y. V. ZELENKO²

^{1*}Dep. «Chemistry and Engineering Ecology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 091 74 51, e-mail samarskaya.av@gmail.com, ORCID 0000-0002-0828-9457

²Dep. «Chemistry and Engineering Ecology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 774 04 64, e-mail j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

ASSESSMENT OF THE RAILWAY INFLUENCE ON THE HEAVY METAL ACCUMULATION IN SOIL

Purpose. The scientific paper aims at analyzing the current state of the railway infrastructure soil contamination with heavy metals (HM), namely, the three stations of Prydniprovsk railway: Kamianske-Pasazhyske, Zaporizhzhia-Kamianske and Trytuzna. **Methodology.** The research object is the soil of the above mentioned railway stations, the research subject is the total content of HM. Sampling was carried out every 15 m between and outside both rails up to the end of railway ties. The total area of the investigated sites is 600 m². The total form of Fe, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd and Mn concentration was determined by the atomic absorption spectrometry method. The obtained data were compared with the background concentration of HM for Dnipropetrovsk oblast and the results of analyzing the reference control located at a distance of 250 m from the railway stations. **Findings.** It is found out that rail transport is a source of HM emission into soil. The findings indicate that the soil state of the Kamianske-Pasazhyske station corresponds to a low ecological risk and a low degree of pollution, since the station is a passenger one only and pollution occurs mostly due to the friction of wheels and rails and that of the pantograph and overhead system, as well as the pesticide use. The soil contamination of the Zaporizhzhia-Kamianske station is characterized by a considerable potential environmental risk and a very high degree of pollution. This station is a cargo-passenger one, and this pollution level is mainly due to loading and unloading processes. The soil of the Trytuzna station is characterized by an average potential ecological risk and a moderate degree of pollution. Although this station is mainly used for the freight trains reformation, but due to the transportation of large volumes of bulk ore cargoes HM fall into soil. Besides, the station is not electrified. Recommendations for assessment of the soil pollution levels are given. **Originality.** For the first time the potential ecological risk of soil contamination was determined on the basis of the physical and chemical analysis of the HM content in the soil of the above-mentioned stations. **Practical value.** The results of the study can be used as a justification of the reasonability of introducing the environmental monitoring programs for the railway land, the environmental protection measures for the soil treatment from HM, correcting the railway exclusion zone, as well as protection of adjacent territories from the propagation and accumulation of the mentioned pollutants. The necessity and urgency of the constant control of the HM content in the railway soil and the relevance of the research continuation in this scientific direction are confirmed on the basis of the received data.

Keywords: heavy metals; railway transport; soil, railway stations, potential environmental risk

Introduction

Rail transport operation has a negative influence on the environmental quality. This influence can be seen in the environmental contamination with both organic (oil products, polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls), and inorganic substances (heavy metals, SO₂, CO, CO₂, NO₂, etc.).

Studies devoted to railway transport as a factor of environmental pollution confirm the hypothesis that this mode of transport can bring to soil such persistent and dangerous pollutants as heavy metals (hereinafter – HM) [1, 4-7, 10-14, 17-20].

HM concentration in soil samples taken in the space between rails may exceed the benchmarks ten times. For example, the study of Polish scientists demonstrates the following HM concentration in the soil of the Іława Główna railway junction, mg/kg: in the area of sidings Pb – 448¹/494²; Cd – 5,4¹/5,1²; Cu – 191¹/161²; Zn – 1264¹/1223²; Hg – 0,573¹/0,969²; Fe – 44800¹/39700²; Co – 9¹/8²; Cr – 67¹/58²; Mo – 2¹/2² (1 – between rails, 2 – outside rails) [13]. The HM content indicators in three reference sites mg/kg: Pb – 1^a/2^b/3^c; Cd – n.d.^a/n.d.^b/n.d.^c; Cu – 4^a/4^b/4^c; Zn – 23^a/23^b/18^c; Hg – 0,014^a/0,05^b/0,013^c; Fe – 4400^a/4500^b/5000^c;

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Co – 1^a/1^b/2^c; Cr – 5^a/6^b/8^c; Mo – n.d.^a/n.d.^b/1^c. n.d. – not detected, ^a – 500 m southwest from the railway junction, ^b – 500 m to the southeast, ^c – 2 km to the east [13].

The obtained data demonstrate the significant content of iron, which is natural for railway transport, lead, cadmium, copper and zinc, which may indicate specificity of the cargoes transported, loaded and unloaded at this station.

Another study, conducted by Kajetan Dzierżanowski and Stanisław W. Gawronski also confirms the assumption that railway transport plays a significant part in the HM accumulation in soil and plants. The study was conducted *in situ* at the Warsaw-Otwock railway connection using the X-ray fluorescent spectrometer [11]. The authors compare the obtained results with the permissible levels of HM concentration in the surface layer for transport lands, mg/kg approved in Poland [11]. Table 1 presents the results of Kajetan Dzierżanowski and Stanisław W. Gawronski's investigation and the permissible levels of HM concentration in Poland, approved in 2002.

Table 1

HM concentration in surface layer of the Warsaw-Otwock railway ground and permissible levels of HM concentration

HM	Concentration, mg/kg	Standard deviation, mg/kg	Permissible concentration levels of HM
Ba	1 092.1	299.1	1000
Cr	1 108.4	331.4	500
Zn	142.4	17.7	1 000
Cu	894.3	41.5	600
Mn	1 528.9	160.9	–
Mo	18.0	4.0	250
Ni	588.1	101.1	300
Pb	65.0	8.3	600
Hg	25.3	6.0	30
Fe	196 112.7	3 909.8	–

The presented data show the high content of such metals as barium, chromium, copper, nickel, mercury and iron typical of railways. It should be noted that it is difficult to assess the degree of the railway operation influence on the HM accumulation without

comparing the obtained data with those at the referent sites or background concentration. It can only be concluded that the approved standards for Ba, Cr, Cu and Ni have been exceeded.

However, the data on the HM accumulation in plants in the area adjacent to the Warsaw-Otwock railway junction is of greater interest. For example, *Viola arvensis* accumulates approximately 230 mg/kg Zn, *Vicia cracca* – \approx 30 mg/kg Mo, *Cerastium dubium* – \approx 160 mg/kg Cu, 400 mg/kg Mn, 8 mg/kg Pb, 34000 mg/kg Fe [11]. This, in turn, confirms the railway transport influence on the HM introduction and accumulation both in the soil of adjacent territories and in plants that grow there.

According to the results of chemical analysis of the soil samples from the Białystok Fabryczny, Siemianówka and Waliły railway stations in 2015 [20], the pollution levels appear to be much lower than in previous studies. However, the soil biotesting shows significant toxicity of the soil of the Białystok Fabryczny and Siemianówka stations [20]. The information is given in Table 2.

Table 2

Results of chemical analysis of the soil samples from the Białystok Fabryczny, Siemianówka and Waliły railway stations

HM	Station		
	Białystok Fabryczny	Siemianówka	Waliły
Zn	130 ± 10.4	75 ± 6.0	106 ± 8.58
Cu	107 ± 16.1	27 ± 4.1	46 ± 6.9
Pb	153 ± 27.5	20 ± 3.6	27 ± 4.9
Ni	14 ± 3.4	17 ± 4.1	52 ± 12.5
Hg	0.06 ± 0.01	<0.05	<0.05
Cd	<0.70	<0.70	<0.70
Cr	25 ± 5.3	15 ± 3.2	70 ± 14.7

It is important the fact that at present in Ukraine there are no legally approved permissible levels of HM concentration for transport and communication lands, industry and urban territories.

As for the HM sources at railway transport, they are, in the first place, cargo transportation, its dispersing, scattering and spilling on the track and adjacent territories [1, 5–7, 10–14, 19]. For example, the total amount of losses during the transportation of mineral fertilizers in bulk in covered cars

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

is up to 8%, in gondola cars up to 28%. When transported in multi-purpose cars annually up to 7% of ore and 3% of cement are lost [7].

According to the State Statistics Service of Ukraine [3], the railway transport ranks first in terms of cargo transportation volumes. The Tables 3 and 4 show the cargo turnover, volumes of cargo transportation in 2017, and transportation of various types of cargo by rail in 2017, respectively.

Other sources of HM at railway transport:

– friction in systems: wheel-brake blocks,

wheel-rail, pantograph-contact wire, bearings [5–7, 10–14, 18, 19];

– use of herbicides [7, 13];

– coal heating of cars [5–7];

– exhaust gases of locomotive engines [5–7, 10, 12];

– migration from wooden and ferro-concrete sleepers, from rubble and ballast section materials [5–8, 10, 14];

– garbage discarded from trains and on platforms.

Table 3

Cargo turnover and volumes of cargo transportation in 2017

	Cargo turnover		Volume of transported cargoes	
	mln. tkm	in % to 2016.	mln.t	in % up 2016.
Transport	343 057.1	105.8	635.9	101.8
railway	191 914.1	102.3	339.5	98.9
automobile	41 178.8	108.4	175.6	104.7
water	4 257.1	106.3	5.9	88.1
pipeline	105 434.4	111.7	114.8	107.6
air	272.7	120.5	0.1	110.5

Table 4

Cargo transportation in 2017

	Performed, mln.t	In % to 2016.
Transported cargoes	339.5	98.9
dispatched	277.3	94.9
According to freight nomenclature		
coal	43.9	76.2
coke	5.0	70.8
oil and petroleum products	3.8	115.3
iron ore and manganese ore	64.9	93.5
ferrous metals	20.8	82.4
ferrous scrap	3.1	114.9
timber cargo	2.8	66.8
chemical and mineral fertilizers	3.5	84.2
grains and grinding products	35.7	111.8
cement	5.9	101.0
construction material	41.2	116.5
other cargoes	46.7	118.0

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Moreover, the HM accumulation in soil during the railway operation is influenced by a wide range of factors: intensity and speed of train movement; age of the railway and degree of its operation; initial braking speed, braking length; the nature and volumes of transported cargoes; weather conditions; relief; granulometric and chemical content of soil; vegetative cover.

Therefore, the HM content in the railway infrastructure soil can differ considerably and vary widely. Accordingly, the study of the railway transport influence on the HM emission into the soil is an important direction of scientific research.

Purpose

The main purpose of the article is analyzing the current state of the railway infrastructure soil contamination with HM; assessing and determining the rail transport share in the problem of the HM accumulation in soil.

In order to achieve the purpose, the following stages are realized: literary review of the problem; analytical assessment of soil contamination levels of railway stations with heavy metals; calculations of total contamination and potential environmental risks of soil contamination with HM; development of recommendations for further monitoring the toxicological state of soil.

Methodology

The research object is the soil of the three railway stations of Prydniprovsk railway:

1) passenger station – Kamianske-Pasazhyske, year of opening 1965, electrified (hereinafter – «KP» station);

2) freight-passenger station – Zaporizhzhia-Kamianske, year of opening 1884, electrified (hereinafter – «KZ» station);

3) freight station – Trytuzna, year of opening 1884, non-electrified (hereinafter station «T»).

The research subject is the total content of HM. Determining the total forms are enough for the space between tracks, since the moving ones play a minor role in this case, there is no migration in the «soil-plant» and «soil-plant-man» chains.

The sampling scheme is shown in Figure 1. Sampling was carried out every 15 m between (1) and outside both rails (2). The weight of each sample is 250-300 g, the depth of sampling is 0-20 cm. The total area of the investigated sites is 600 m². The principle of the sampling choice is determined by the fact that the stations are surrounded by buildings and the HM distribution at different distances cannot be assessed.

The reference sites are at a distance 250 m from each station. The sampling was carried out using the «envelope» method.

Figure 2 shows the places of the soil sampling. It was carried out at the end of August 2017 in dry, hot weather.

The HM concentration in station soil was determined by the atomic-adsorption method. Total forms of HM were extracted with nitric acid (1:1). The HM content in the studied soil samples was calculated using the formula (1):

$$X = V \cdot (C_1 - C_0) / m$$

where X – is the mass fraction of the i -th metal, determined in the air-dry soil sample, mg/kg; C_1 – is the concentration of the i -th metal in the studied acid extract of soil, found according to the calibration graph, mg/dm³; C_0 – is the concentration of the i -th metal in the control sample found according to the calibration graph, mg/dm³; V – is the volume of the investigated solution, cm³; m – is the weight of the air-dry soil sample, g.

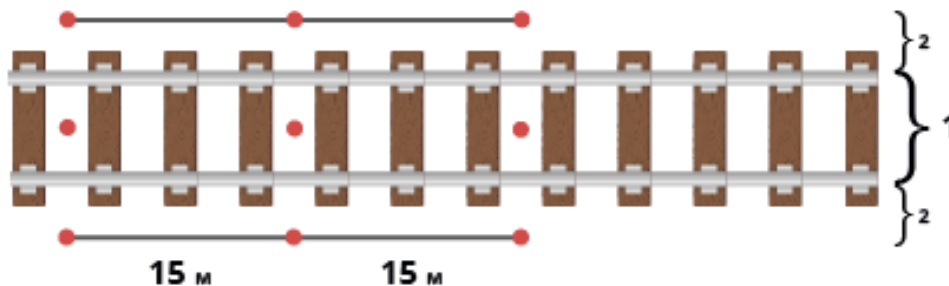


Fig. 1. The scheme of sampling at railway stations

1 – the area of sampling between rails, 2 – the area of sampling outside both rails

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ



Fig. 2. The sampling sites at the station Kamianske-Pasazhyrske

In order to assess the level of the HM accumulation in soil, we calculated a total contamination index Z_c , which reflects the complex influence of the whole group of elements and is determined as the additive sum of the excess of elements concentration coefficient above the background level using formula 2 [2]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n Kc - (n - 1) \quad (2)$$

where n – is the number of elements under consideration, Kc – is the coefficient of concentration (accumulation), the ratio of actual concentration to background content [2].

Although this methodology is used in many works related to the assessment of HM accumulation in soil, the disadvantage of the Z_c indicator is that it does not reflect the toxicity of each metal, therefore, it is advisable to use such an indicator as RI – potential environmental risk of soil contamination, which is determined by the formula 3 [9, 15, 16]:

$$RI = \sum E_i \quad (3)$$

where E_i – is a risk factor for the i -th HM,

$$E_i = T_i f_i = T_i \frac{C_i}{S_i} \quad (4)$$

where T_i – is the factor reflecting the toxicity of the i -th HM and the degree of environmental sensitivity to this metal, the values of T_i for Hg, Cd, As, Ni, Cu, Pb, Cr, Zn and Mn are 40, 30, 10, 5, 5, 5, 2, 1 and 1, respectively; f_i – is the ratio of the actual concentration of HM, (C_i) to its background content (S_i) [9, 15, 16]. Classifications of Z_c and RI are presented in the Tables 5 and 6.

Table 5

Classification of the total soil contamination index Z_c

Contamination degree	Z_c
very low	< 8
low	8–16
moderate	16–32
high	32–64
very high	64–128
extremely high	> 128

Table 6

Classification of potential ecological risk of soil contamination

E_i	Individual	RI	General
$E_i \leq 40$	Low	$RI \leq 150$	Low
$40 < E_i \leq 80$	Average	$150 < RI \leq 300$	Average
$80 < E_i \leq 160$	Significant	$300 < RI \leq 600$	Significant
$160 < E_i \leq 320$	High	$RI > 600$	Very high
$E_i > 320$	Extremely high		

Findings

The research results are presented in Table 7. We determined the concentration of total forms of Mn, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, and Fe in the soil of «KP», «ZK», «T» stations and at the three refer-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ence sites where the anthropogenic influence is quite insignificant.

The given data across the board exceed the reference indexes and the background concentration, which shows the direct railway transport influence on the HM accumulation in soil.

The obtained results indicate that the soil state of the «KP» station corresponds to a low ecological risk and a low degree of contamination, since it is a passenger station only and pollution occurs mostly due to the friction of wheels and rails, that of the pantograph and contact wire, as well as the herbicide use.

The soil contamination of the «ZK» station is characterized by a significant potential environmental risk and a very high degree of pollution. This station is a freight-passenger one and the pollution level is mainly due to the loading and unloading processes.

The soil of the «T» station is characterized by an average potential environmental risk and a moderate degree of pollution. Although this station is used for the freight trains reformation, but due to transporting large volumes of bulk ore cargoes HM fall into the station soil. Moreover, the station is not electrified.

Originality and practical value

For the first time the potential ecological risk of soil contamination was determined on the basis of the physical-chemical analysis of the HM content in the soil of the «KP», «ZK» and «T» stations. The obtained data prove the necessity and urgency of constant monitoring the HM content in the railway infrastructure soil.

The results of the study can be used as a justification of the reasonability of introducing the environmental monitoring programs for the railway lands, the environmental protection measures for the soil treatment from HM, protection of the territories adjacent to railway from the propagation and accumulation of the mentioned pollutants as well as correcting the railway exclusion zone

Conclusions

Taking into consideration the fact that the railway transport operation can lead to the significant level of the soil contamination with HM, which exceeds the regulatory one, it is necessary to develop recommendations for non-purpose (agricultural) use of land sites within the damping zone of railways.

According to the presented data, differentiating the railway mainline zones with high pollution indicators was carried out and the recommendations on the measures for decontamination and detoxification of the railway infrastructure soil were developed.

We recommend to calculate the Z_c and RI indices for assessing the levels of soil contamination, as well as to determine the HM concentration at the reference sites, since the use of background concentration for comparison generates many questions and concerns, although it is used by many researchers. And as a final stage of assessment we suggest carrying out biotesting, which demonstrates the toxic influence (or its absence) of the investigated soil on plants, crustaceans, bacteria and other living organisms.

Table 7

General indicator of contamination and the potential ecological risk of stations soil pollution

Stations and indicators according to the methodology	Heavy metal concentration, mg/kg													
	Mn (600*)		Cu (20*)		Zn (30*)		Ni (10*)		Pb (10*)		Cd (1*)		Fe (22 000*)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
«KP»	654	670	61	60	178	170	32	31	40	35	1.5	1.5	35 670	35 660
Kc	1.1	1.1	3.1	3.0	5.9	5.7	3.2	3.2	4.0	3,5	1.5	1.5	1,6	1.6
E _i	1.1	1.1	15.2	15	5.9	5.7	16	16	20	17.5	45	45	1.6	1.6
RI	103.35 – low potential ecological risk													
Z _c	14 – low contamination degree													

General indicator of contamination and the potential ecological risk of stations soil pollution

Stations and indicators according to the methodology	Heavy metal concentration, mg/kg													
	Mn (600 [*])		Cu (20 [*])		Zn (30 [*])		Ni (10 [*])		Pb (10 [*])		Cd (1 [*])		Fe (22 000 [*])	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
«ZK»	2 220	2 220	456	476	678	656	111	115	340	324	4	4	61 860	61 230
Kc	3.7	3.7	22.8	23.8	22.6	21.8	11.1	11.5	34	32.4	4	4	2.8	2.8
E _i	3.7	3.7	114	119	22.6	21.8	55.5	57.5	170	162	120	120	2.8	2.8
RI	487.7 – significant potential ecological risk													
Z _c	94.5 – very high contamination degree													
«T»	710	715	75	67	180	179	63	65	150	130	2	2	48 700	48 705
Kc	1.18	1.19	3.75	3.35	6	6	6.3	6.5	15	13	2	2	2.2	2.2
E _i	1.18	1.19	18.8	16.8	6	6	31.5	32.5	75	65	60	60	2.2	2.2
RI	189.14 – average potential ecological risk													
Z _c	29.3 – moderate contamination degree													
Reference sites	340 ¹ /240 ² /300 ³		6 ¹ /5 ² /6 ³		23 ¹ /30 ² /40 ³		7 ¹ /6 ² /7 ³		10 ¹ /8 ² /5 ³		0.5 ¹ /0.3 ² /n.d. ³		2340 ¹ /3078 ² /1460 ³	

* – background HM content in soil of Dnipropetrovsk oblast

1, 2, 3 – benchmarks of the HM content for the «KP», «ZK» and «T» stations, respectively.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бобрик, Н. Ю. Поширення та акумуляція важких металів у ґрунтах призалізничних територій / Н. Ю. Бобрик // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія: Біологія. Екологія. – 2015. – Вип. 23 (2). – С. 183–189. doi: 10.15421/011526
2. Дабахов, М. В. Тяжелые металлы: Экотоксикология и проблемы нормирования : монография / М. В. Дабахов, Е. В. Дабахова, В. И. Титова. – Нижний Новгород : ВВАГС, 2005. – 165 с.
3. Державна служба статистики України [Electronic resource]. – Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua> – Title from the screen. – Accessed : 23.07.2018.
4. Журавлева, М. А. Загрязнение придорожной зоны тяжелыми металлами / М. А. Журавлева, Н. И. Зубрев, С. М. Кокин // Мир транспорта. – 2014. – Т. 12, № 6. – С. 174–178.
5. Зеленько, Ю. В. Проблема забруднення важкими металами смуги відводу залізниць / Ю. В. Зеленько, А. В. Самарська // Залізн. трансп. України. – 2014. – № 5 (108). – С. 51–53.
6. Казанцева, М. Ю. Железнодорожный транспорт как источник загрязнения окружающей среды / М. Ю. Казанцева, Д. А. Зибарева // Самарский научный вестник. – 2014. – № 4 (9) – С. 54–56.
7. Казанцев, И. В. Железнодорожный транспорт как источник загрязнения почв тяжелыми металлами / И. В. Казанцев // Самарский научный вестник. – 2015. – № 2 (11). – С. 94–96.
8. Крошечкина, И. Ю. Комплексная оценка загрязнения балластного слоя железнодорожного полотна / И. Ю. Крошечкина, Н. И. Зубрев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 1 (17). – С. 100–102.
9. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization / Y. Hu, X. Liu, J. Bai, K. Shih, E. Y. Zeng, H. Cheng // Environmental Science and Pollution Research. – 2013. – Vol. 20. – Iss. 9. – P. 6150–6159. doi: 10.1007/s11356-013-1668-z
10. Does the Function of Railway Infrastructure Determine Qualitative and Quantitative Composition of Contaminants (PAHs, Heavy Metals) in Soil and Plant Biomass? / M. Mętrak, M. Chmielewska, B. Sudnik-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- Wójcikowska, B. Wiłkomirski, T. Staszewski, M. Suska-Malawska // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2015. – Vol. 226. – Iss. 8. doi: 10.1007/s11270-015-2516-1
11. Dzierżanowski, K. Heavy metal concentration in plants growing on the vicinity of railroad tracks: a pilot study / K. Dzierżanowski, S. W. Gawroński // *Challenges of Modern Technology*. – 2012. – Vol. 3, No. 1. – P. 42–45.
 12. Railway Tracks – Habitat Conditions, Contamination, Floristic Settlement – A Review / B. Wiłkomirski, H. Galera, B. Sudnik-Wójcikowska, T. Staszewski, M. Malawska // *Environment and Natural Resources Research*. – 2012. – Vol. 2, No. 1. – P. 86–95. doi: 10.5539/enrr.v2n1p86
 13. Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution / B. Wiłkomirski, B. Sudnik-Wójcikowska, H. Galera, M. Wierzbicka, M. Malawska // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2010. – Vol. 218. – Iss. 1-4. – P. 333–345. doi: 10.1007/s11270-010-0645-0
 14. Soil and plants contamination with selected heavy metals in the area of a railway junction / T. Staszewski, M. Malawska, B. Studnik-Wójcikowska, H. Galera, B. Wiłkomirski // *Archives of Environmental Protection*. – 2015. – Vol. 41, No. 1. – P. 35–42. doi: 10.1515/aep-2015-0005
 15. Soil Heavy Metal Pollution and Risk Assessment in Shenyang Industrial District, Northeast China / X. Jiao, Y. Teng, Y. Zhan, J. Wu, X. Lin // *Plos One*. – 2015. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. e0127736. doi: 10.1371/journal.pone.0127736
 16. Soliman, N. F. Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt / N. F. Soliman, S. M. Nasr, M. A. Okbah // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 13. – Iss. 1. doi: 10.1186/s40201-015-0223-x
 17. The effects of railway transportation on the enrichment of heavy metals in the artificial soil on railway cut slopes / Z. Chen, K. Wang, Y. W. Ai, W. Li, H. Gao, C. Fang // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2013. – Vol. 186. – Iss. 2. – P. 1039–1049. doi: 10.1007/s10661-013-3437-3
 18. The effects of the Qinghai–Tibet railway on heavy metals enrichment in soils / H. Zhang, Z. Wang, Y. Zhang, Z. Hu // *Science of the Total Environment*. – 2012. – Vol. 439. – P. 240–248. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.09.027
 19. The selected trace elements in soil of railway stations in north-eastern Poland / B. Wiłkomirski, M. Suska-Malawska, B. Sudnik-Wójcikowska, T. Staszewski // *Rocznik Świętokrzyski. Ser. B – Nauki Przyr.* – 2013. – T. 34. – P. 171–180.
 20. Wierzbicka, M. Multidimensional evaluation of soil pollution from railway tracks / M. Wierzbicka, O. Bemowska-Kalabun, B. Gworek // *Ecotoxicology*. – 2015. – Vol. 24. – Iss. 4. – P. 805–822. doi: 10.1007/s10646-015-1426-8

A. В. САМАРСЬКА^{1*}, Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО²

^{1*}Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 091 74 51, ел. пошта samarskaya.av@gmail.com, ORCID 0000-0002-0828-9457

²Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 774 04 64, ел. пошта j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НА НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ҐРУНТАХ

Мета. Наукова стаття має за мету аналіз сучасного стану забруднення важкими металами (ВМ) ґрунтів залізничної інфраструктури, а саме трьох станцій Придніпровської залізниці: Кам'янське–Пасажирське, Запоріжжя–Кам'янське й Тритузна. **Методика.** Об'єкт дослідження – ґрунти вищезазначених залізничних станцій, предмет – валовий вміст ВМ. Відбір проб здійснювався кожні 15 м між рейками та поза ними з обох сторін. Загальна площа досліджуваних територій – 600 м². Методом атомно-абсорбційної спектрометрії визначено концентрації валових форм Fe, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd та Mn. Отримані дані порівнювались із фоновими концентраціями ВМ для Дніпропетровської області та з результатами аналізу контрольних ділянок, що знаходились на відстані 250 м від залізничних станцій. **Результати.** Встановлено, що залізничний транспорт є джерелом надходження ВМ у ґрунти. Отримані результати вказують на те, що стан ґрунтів станції Кам'янське–Пасажирське відповідає низькому екологічному ризику й слабкому ступеню

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

забруднення, оскільки станція є тільки пасажирською, і забруднення відбувається за рахунок тертя коліс та рейок, пантографа об контактну мережу, а також використання пестицидів. Забруднення ґрунтів станції Запоріжжя–Кам'янське відрізняється значним потенційним екологічним ризиком і дуже сильним ступенем забруднення. Ця станція є вантажно-пасажирською, і такий рівень забруднення є здебільшого наслідком процесів завантаження й розвантаження. Ґрунти станції Тритузна характеризуються середнім потенційним екологічним ризиком та помірним ступенем забруднення. На цій станції відбувається переформування товарних поїздів, але за рахунок перевезення значних обсягів сипучих рудних вантажів у ґрунти станції потрапляють ВМ. Крім того, станція неелектрифікована. Надано рекомендації щодо оцінки рівнів забруднення ґрунтів. **Наукова новизна.** Вперше на базі проведеного фізико-хімічного аналізу вмісту ВМ ґрунтах вищезазначених станцій визначено потенційний екологічний ризик забруднення ґрунтів. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані як обґрунтування доцільності впровадження програм екологічного моніторингу для земель залізничного транспорту, природоохоронних заходів із очищення ґрунтів від ВМ, коригування зони відчуження залізниць і захисту прилеглих територій від розповсюдження та акумуляції цих політантів. На основі отриманих даних доведена необхідність постійного контролю вмісту ВМ у ґрунтах залізничної інфраструктури й актуальність продовження досліджень у даному науковому напрямку.

Ключові слова: важкі метали; залізничний транспорт; ґрунти; залізничні станції; потенційний екологічний ризик

А. В. САМАРСЬКА^{1*}, Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО²

^{1*}Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 091 74 51, ел. пошта samarskaya.av@gmail.com, ORCID 0000-0002-0828-9457

²Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 774 04 64, ел. пошта j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГРУНТАХ

Цель. Научная статья своей целью имеет анализ современного состояния загрязнения ґрунтов железнодорожной инфраструктуры тяжелыми металлами (ТМ), а именно трех станций Приднепровской железной дороги: Каменское–Пассажи́рское, Запоро́жье–Каменское и Триту́зная. **Методика.** Объект исследования – ґрунты вышеупомянутых железнодорожных станций, предмет – валовое содержание ТМ. Отбор проб осуществлялся каждые 15 м между рельсами и за ними с обеих сторон. Общая площадь исследуемых территорий – 600 м². Методом атомно-абсорбционной спектрометрии определены валовые концентрации Fe, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd и Mn. Полученные данные сравнивались с фоновыми концентрациями ТМ для Днепропетровской области и результатами анализа контрольных участков, находящихся на расстоянии 250 м от железнодорожных станций. **Результаты.** Установлено, что железнодорожный транспорт является источником поступления ТМ в ґрунты. Полученные результаты указывают на то, что состояние ґрунтов станции Каменское–Пассажи́рское соответствует низкому экологическому риску и слабой степени загрязнения, поскольку станция является только пассажирской, и загрязнение происходит за счет трения колес и рельсов, пантографа о контактную сеть, а также использования пестицидов. Загрязнение ґрунтов станции Запоро́жье–Каменское отличается значительным потенциальным экологическим риском и очень сильной степенью загрязнения. Эта станция является грузопассажирской, и такой уровень загрязнения является в большей степени следствием процессов загрузки и разгрузки. Ґрунты станции Триту́зная характеризуются средним потенциальным экологическим риском и умеренной степенью загрязнения. На этой станции происходит переформирование товарных поездов, но за счет перевозки значительных объемов сыпучих рудных грузов в ґрунты станции попадают ТМ. Кроме того, станция неэлектрифицирована. Даны рекомендации по оценке уровней загрязнения почв. **Научная новизна.** Впервые на основе проведенного физико-химического анализа содержания ТМ в ґрунтах вышеупомянутых станций определены потенциальные экологические риски загрязнения ґрунтов. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы в качестве обоснования целесообразности внедрения программ экологического мониторинга для земель железнодорожного транспорта, природоохранных мероприятий по очистке ґрунтов от ТМ, корректировки зоны от-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

чуждения железных дорог и защиты прилегающих территорий от распространения и аккумуляции этих поллютантов. На основе полученных данных доказана необходимость постоянного контроля содержания ТМ в грунтах железнодорожной инфраструктуры и актуальность продолжения исследований в данном научном направлении.

Ключевые слова: тяжелые металлы; железнодорожный транспорт; грунты; железнодорожные станции; потенциальный экологический риск

REFERENCES

1. Bobryk, N. Y. (2015). Spreading and accumulation of heavy metals in soils of railway-side areas. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 23, 2, 183-189. doi: 10.15421/011526 (in Ukrainian)
2. Dabakhov, M. V., Dabakhova, E. V., & Titova, V. I. (2005). *Tyazhelye metally: Ekotoksikologiya i problemy normirovaniya: Monografiya*. Novgorod: VVAGS. (in Russian)
3. *Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy*. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua> (in Ukrainian)
4. Zhuravleva, M. A., Zubrev, N. I., & Kokin, S. M. (2014). Contamination of roadside areas with heavy metals. *Worlds of Transport and Transportation*, 6, 174-181. (in Russian)
5. Zelenko, Y. V., & Samarska, A. V. (2014). Problema zabrudnennia vazhkymy metalamy smuhy vidvodu zaliznyts. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, 5(108), 51-53. (in Ukrainian)
6. Kazantseva, M. Y., & Zibareva, D. A. (2014). Rail transport as a source of environmental pollution. *Samara Journal of Science*, 4(9), 54-56. (in Russian)
7. Kazantsev, I. V. (2015). Rail transport as a source of soil contamination with heavy metals. *Samara Journal of Science, Journal of Science*, 2(11), 94-96. (in Russian)
8. Kroshechkina, I. Y., & Zubrev, N. I. (2014). Kompleksnaya otsenka zagryazneniya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo polotna. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 1(17), 100-102. (in Russian)
9. Hu, Y., Liu, X., Bai, J., Shih, K., Zeng, E. Y., & Cheng, H. (2013). Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 9, 6150-6159. doi: 10.1007/s11356-013-1668-z (in English)
10. Mętrak, M., Chmielewska, M., Sudnik-Wójcikowska, B., Wiłkomirski, B., Staszewski, T., & Suska-Malawska, M. (2015). Does the Function of Railway Infrastructure Determine Qualitative and Quantitative Composition of Contaminants (PAHs, Heavy Metals) in Soil and Plant Biomass? *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 8, 1-12. doi: 10.1007/s11270-015-2516-1 (in English)
11. Dzierżanowski, K., & Gawroński, S. W. (2013). Heavy metal concentration in plants growing on the vicinity of railroad tracks: a pilot study. *Challenges of Modern Technology*, 3, 1, 42-45. (in English)
12. Wiłkomirski, B., Galera, H., Sudnik-Wójcikowska, B., Staszewski, T., & Malawska, M. (2012). Railway Tracks – Habitat Conditions, Contamination, Floristic Settlement – A Review. *Environment and Natural Resources Research*, 2, 1, 86-95. doi:10.5539/enr.v2n1p86 (in English)
13. Wiłkomirski, B., Sudnik-Wójcikowska, B., Galera, H., Wierzbicka, M., & Malawska, M. (2011). Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution. *Water Air Soil Pollution*, 218, 1-4, 333-345. doi: 10.1007/s11270-010-0645-0 (in English)
14. Staszewski, T., Malawska, M., Studnik-Wójcikowska, B., Galera, H., & Wiłkomirski, B. (2015). Soil and plants contamination with selected heavy metals in the area of a railway junction. *Archives of Environmental Protection*, 41(1), 35-42. doi: <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0005> (in English)
15. Jiao, X., Teng, Y., Zhan, Y., Wu, J., & Lin, X. (2015). Soil Heavy Metal Pollution and Risk Assessment in Shenyang Industrial District, Northeast China. *Plos One*, 10(5). doi:10.1371/journal.pone.0127736 (in English)
16. Soliman, N. F., Nasr, S. M., & Okbah, M. A. (2015). Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1). doi:10.1186/s40201-015-0223-x (in English)
17. Chen, Z., Wang, K., Ai, Y. W., Li, W., Gao, H., & Fang, C. (2013) The effects of railway transportation on the enrichment of heavy metals in the artificial soil on railway cut slopes. *Environ Monit Assess*, 186(2), 1039-1049. doi: 10.1007/s10661-013-3437-3 (in English)
18. Zhang, H, Wang, Z., Zhang, Y., & Hu, Z. (2012). The effects of the Qinghai – Tibet railway on heavy metals enrichment in soils. *Science of the Total Environment*, 439, 240-248. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.027> (in English)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

19. Wilkomirski, B., Suska-Malawska, M., Sudnik-Wójcikowska, B., & Staszewski T. (2013). The selected trace elements in soil of railway stations in north-eastern Poland. *Rocznik Świętokrzyski*, 34, 171-180. (in English)
20. Wierzbicka, M., Bemowska-Kalabun, O., & Gworek, B. (2015). Multidimensional evaluation of soil pollution from railway tracks. *Ecotoxicology*, 24(4), 805-822. doi: 10.1007/s10646-015-1426-8 (in English)

Received: Apr. 26, 2018

Accepted: July 27, 2018

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656. 2. 08

В. Г. ЛОЗА^{1*}

^{1*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 81, ел. пошта poluvagon017@gmail.com, ORCID 0000-0002-1864-5478

ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ АВАРІЙНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Мета. Робота спрямована на узагальнення інформації про сучасний стан й особливості організації рятувальних і невідкладних робіт під час ліквідації надзвичайних ситуацій (НС) на залізничному транспорті України. **Методика.** У процесі дослідження використані методи аналізу для вивчення змісту й основних положень вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій, нормативно-правових актів України та інших джерел про проведення рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті. **Результати.** Із урахуванням позитивного вітчизняного й зарубіжного досвіду у проведенні рятувальних і невідкладних робіт під час ліквідації транспортних подій на залізничному транспорті в роботі розширюються цілі практичного застосування й взаємодії органів управління та сил функціональної підсистеми запобігання й реагування на загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій. З'ясовується можливість урахування цих особливостей під час планування, організації й проведення аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідації наслідків аварій і катастроф на залізничному транспорті. **Наукова новизна.** Отримані результати дозволяють розширити поняття «надзвичайна ситуація на залізничному транспорті». Визначено функції й завдання органів управління, сил і засобів функціональної підсистеми запобігання й реагування на загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій на державному, регіональному та об'єктовому рівні. Описано організацію взаємодії оперативних штабів, координувальних органів і сил цивільного захисту під час реагування на надзвичайні ситуації. **Практична значимість.** Урахування особливостей умов, в яких будуть виконуватись рятувальні й аварійно-відновлювальні роботи на залізничному транспорті, дозволить підвищити оперативність робіт й ефективність взаємодії органів управління й сил функціональної підсистеми запобігання й реагування на загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: надзвичайні ситуації на залізничному транспорті; особливості організації; аварійно-відновлювальні роботи; оперативне реагування; відбудовний поїзд; пожежний поїзд

Вступ

Залізничний транспорт України є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі. Він забезпечує понад 82 % вантажних і майже 50 % пасажирських перевезень, здійснюваних усіма видами транспорту. Україна займає четверте місце за обсягами вантажних перевезень на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії [14].

Зростаюча напруженість роботи залізничного транспорту України потребує гармонійного поєднання технічного розвитку рухомого складу й інфраструктури залізниць із удосконаленням та реорганізацією системи запобігання й ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на транспорті.

Після акціонування залізниць виникла гостра необхідність у прийнятті нових управлінських, технічних і технологічних рішень. Вони повинні

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

включати кардинальні зміни організації роботи підприємств, які увійшли до складу ПАТ «Укрзалізниця», у тому числі й запобігання й ліквідації наслідків аварій і катастроф на залізницях.

Особливої актуальності набуває ця проблема стосовно об'єктів, які перебувають в експлуатації понад 25 років, устаткування й обладнання яких фізично й морально застаріло, а технічні рішення не відповідають сучасному рівню розвитку науки й техніки, вимогам норм і правил промислової безпеки.

Із доступних джерел відомо, що основні виробничі фонди ПАТ «Укрзалізниця» зношені більше, ніж на 90 %, зокрема це стосується рухомого складу (рис. 1).

Потребують заміни більше 20 % залізничних колій, 16 % із яких перебувають в аварійному стані. Відпрацювали нормативний строк і підлягають списанню понад 85,9 % вагонів

електро- і 97 % дизельних поїздів. Із 305 тягових підстанцій понад 40 років працює 197 [10].

Особливу тривогу викликає незадовільний стан відомчих під'їзних залізничних колій, по яких транспортують хімічно, пожежо- й вибухонебезпечні речовини. Окрім вищезазначеного, причинами аварій на залізничному транспорті можуть бути складні метеорологічні умови, людський чинник (помилки в роботі, порушення чинних правил, інструкцій, норм, несанкціоноване втручання і т. ін.), а також терористична діяльність.

За таких умов можна констатувати, що на залізничному транспорті ступінь ризику виникнення аварійних ситуацій достатньо високий. Тому необхідно бути готовим до ліквідації наслідків аварій, катастроф, пожеж та інших подій на транспорті [12].

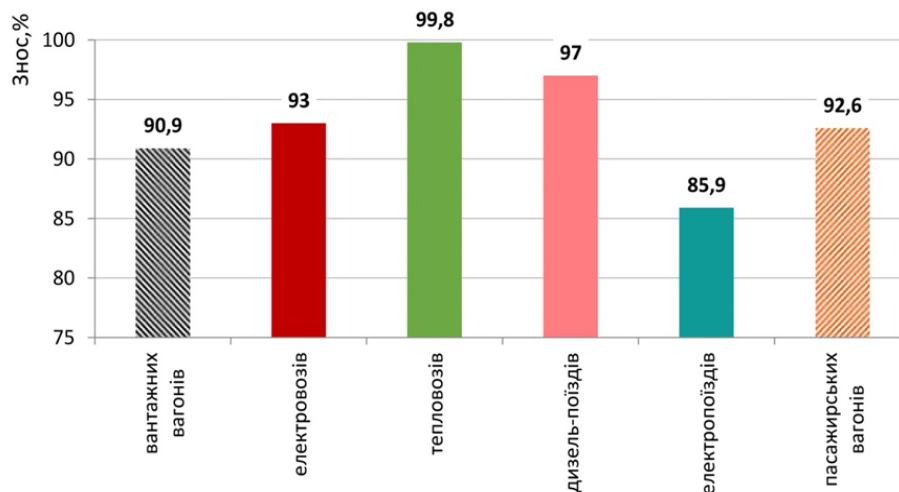


Рис. 1. Зношеність наявного парку рухомого складу Укрзалізниці

Fig. 1. Wear of existing fleet of rolling stock of Ukrzaliznytsia

Мета

Основна мета роботи полягає в узагальненні інформації про сучасний стан й особливості організації рятувальних та невідкладних робіт під час ліквідації надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті.

Методика

У процесі дослідження використані методи аналізу для визначення змісту й основних положень наукових публікацій, нормативно-

правових актів України та інших джерел про надзвичайні ситуації на залізничному транспорті, особливості організації рятувальних та невідкладних робіт під час ліквідації їх наслідків із подальшим їх порівнянням та узагальненням.

Результати

Аналіз показав, що причинами аварійних ситуацій, які мали місце на залізничному транспорті, найчастіше є сходження рухомого складу з рейок, зіткнення, наїзди на перешкоди на

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

переїздах, пожежі й вибухи безпосередньо у вагонах. Під час транспортування таких вантажів, як скраплені гази, легкозаймисті, вибухонебезпечні, отруйні та радіоактивні речови-

ни, виникають витоки, вибухи, наслідком чого є зараження місцевості (рис.2). Не виключені розмиви залізничних колій, обвали, зсуви, повені.

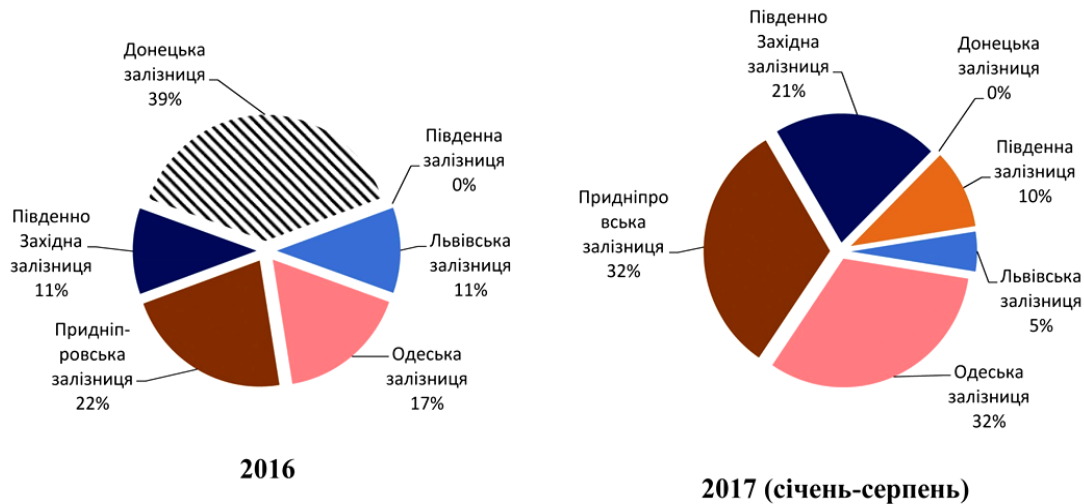


Рис. 2. Надзвичайні події з небезпечними вантажами

Fig. 2. Accidents with dangerous goods

Наказом Міністерства інфраструктури України від 03.07.2017 № 235 затверджене Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті [2]. У ньому подано визначення таких подій, як катастрофа, аварія, інцидент.

Аварії поділяються на такі категорії:

- зіткнення, сходження з рейок рухомого складу залізничного транспорту;
- аварії на залізничних переїздах та поза ними;
- аварії з особами, завдані рухомим складом залізничного транспорту, що переміщався;
- аварії з небезпечними вантажами;
- пожежі тощо.

Ознаками (наслідками) катастроф є: транспортна подія, що призвела до пожежі на рухомому складі залізничного транспорту, зіткнення рухомого складу з іншим рухомим складом, сходження рухомого складу на перегоні чи станції, під час поїзної або маневрової роботи, екіпірування або інших переміщень, що спричинило шкоду життю й здоров'ю людини.

До основних факторів ризику на залізничному транспорті належать перевезення великої кількості небезпечних вантажів (до 3 926 найменувань) [1]. Вони є потенційним джерелом

виникнення надзвичайних ситуацій із великою кількістю потерпілих, значними матеріальними збитками, настанням несприятливих екологічних і санітарно-гігієнічних наслідків.

Практика показує, що найбільш небезпечними аваріями є ті, які супроводжуються пожежею, бо в цьому випадку ліквідація наслідків аварії пов'язана у першу чергу з необхідністю ліквідації горіння. Тільки після локалізації пожежі можливе проведення всього комплексу робіт із ліквідації наслідків аварії та відновлення руху поїздів. Дослідження великої кількості аварій, які супроводжувались пожежею, показали, що в результаті горіння аварійна ситуація значно ускладнюється, а у випадках, коли не застосовуються ефективні заходи боротьби з вогнем, саме розвиток пожежі створює умови, за яких розміри й наслідки аварії суттєво збільшуються [11].

Кожна аварія може мати два принципових варіанти розвитку [7]:

1. Аварія без пожежі (зіткнення, перекидання вагона, сходження з рейок, розливання або витікання небезпечних вантажів та ін.).

2. Аварія, яка супроводжується пожежею (горіння цистерн, горіння продукту, що витікає або розливається, горіння пасажирських та інших вагонів і стаціонарних споруд).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Характерними особливостями залізничного транспорту, які необхідно враховувати під час планування й організації аварійно-рятувальних робіт у надзвичайних ситуаціях, є [7]:

- велика маса рухомого складу (загальна маса вантажного потяга становить 3–5 тис. т, маса пасажирського потяга – близько 1 тис. т, маса однієї цистерни – 80–100 т);

- висока швидкість рухомого складу (до 200 км/год), при цьому екстремий гальмівний шлях становить сотні метрів;

- наявність на шляху прямування небезпечних ділянок доріг (мостів, тунелів, спусків, підйомів, переїздів, сортувальних гірок);

- наявність електричного струму високої напруги (до 30 кВ);

- вплив людського фактора на причини виникнення аварії (управління локомотивом, комплектування складу, диспетчерське обслуговування);

- різноманіття вражаючих факторів і небезпека їх комбінування;

- важкодоступність місця аварії для рятувальників, пожежників, спеціалістів (болота, чагарники, високі насипи; значна кількість залізничних колій на великих станціях і вузлах).

Слід відзначити, що з початком бойових дій на території Донецької й Луганської областей залізнична інфраструктура України потерпає від терористичних актів: підірвання мостів, залізничних колій, вагонів, опор ЛЕП та інших об'єктів і конструкцій. Для безпечного виконання аварійно-відновлювальних робіт необхідно попередньо проводити пошук та знешкодження боєприпасів і вибухівки. До таких робіт слід залучати спеціальні саперні підрозділи Державної спеціальної служби на транспорті, Державної служби надзвичайних ситуацій (ДСНС) та Міністерства оборони.

У разі виникнення аварій із небезпечними вантажами для проведення дегазації, дезактивації території, рухомого складу, вантажів треба планувати залучення спеціалізованих підрозділів хімічного й радіаційного захисту ДСНС і Міністерства оборони України.

Згідно з Інструкцією з організації відбудовних робіт при ліквідації наслідків транспортних подій на залізницях України, затвердженою наказом Міністерства транспорту України від 27 квітня 2001 р. № 258, інформація про надзвичайну ситуацію на залізничному транспорті

надходить через телефонний або радіозв'язок від начальника поїзда (машиніста) черговому на найближчій станції (рис. 3) [3]. Останній передає інформацію про місце й характер НС згідно з планом взаємодії органів управління й сил територіальної підсистеми Єдиної державної системи цивільного захисту [5]. До такої інформації, зокрема, належать: дата, час і місце виникнення надзвичайної ситуації, відомості про поїзд, кількість загиблих і травмованих, ступінь пошкодження рухомого складу, об'єктів і споруд, опис обставин, метеорологічні умови, характер місцевості й умови доступу до місця аварії, інформація про вантаж і дані про аварійно-відбудовні роботи. Якщо в рухомому складі, що зійшов, є небезпечні вантажі, і виникла загроза населенню, то слід негайно повідомити місцеві органи влади, регіональні органи ДСНС для залучення спеціалізованих формувань, призначених для ліквідації наслідків транспортних подій із небезпечними вантажами, відповідно до Правил безпеки та порядку ліквідації наслідків аварійних ситуацій із небезпечними вантажами при перевезенні їх залізничним транспортом, і спільно з ними організувати евакуацію людей, що проживають і перебувають у зоні події [6].

Для ліквідації наслідків сходження поодинокого рухомого складу на станціях дирекції залізничних перевезень, держпідприємства організують аварійно-польові команди. Для ліквідації наслідків сходження з рейок і зіткнень рухомого складу, а також для надання допомоги під час стихійного лиха призначений відбудовний поїзд, який перебуває на балансі і в підпорядкуванні Дирекції залізничних перевезень [4].

Під час організації аварійно-рятувальних робіт із ліквідації наслідків залізничних аварій і катастроф слід враховувати наступні особливості [7]:

- аварії й катастрофи виникають на шляху прямування, як правило, раптово, у більшості випадків на великій швидкості, що призводить до тілесних пошкоджень у постраждалих, виникнення у них шокового стану й загибелі;

- несвоєчасне отримання достовірної інформації про аварію чи катастрофу може призвести до запізнення надання допомоги, збільшення кількості жертв, у тому числі за відсутності навиків виживання у постраждалих;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– відсутність, як правило, на початковому етапі рятувальних робіт, спеціальної техніки, необхідних засобів пожежогашіння та складність в організації ефективних заходів евакуації з місця аварії;

– складність у визначенні числа постраждалих на місці аварії чи катастрофи, необхідність їх розподілу та відправки в медичні заклади з урахуванням специфіки лікування;

– ускладнення обстановки в разі аварії чи катастрофи під час перевезення небезпечних вантажів;

– необхідність організації пошуку останків загиблих і речових доказів катастрофи часто на великій площі;

– необхідність організації прийому, розміщення, обслуговування (харчування, послуги зв'язку, транспортування та ін.) прибулих родичів постраждалих, організації відправлення загиблих до місця їх поховання;

– необхідність швидкого відновлення руху на ушкоджених коліях [8].

Як свідчить практика, більшість аварійно-відновлювальних робіт залізниці виконують своїми силами й засобами протягом доби. Але за НС із великою кількістю постраждалих і загиблих, коли необхідно виконувати складні рятувальні роботи з виймання людей із-під завалів і зруйнованих вагонів, до ліквідації аварій залучають додаткові сили й засоби, що входять до територіальної підсистеми Єдиної державної системи цивільного захисту.

У таких випадках важливе значення має чітка взаємодія всіх учасників ліквідації аварії, тому що, крім технічних проблем (розбирання завалів, гашіння пожеж і відновлювання залізничних колій), необхідно вирішувати інші завдання, які потребують залучення додаткових сил і ресурсів [14].

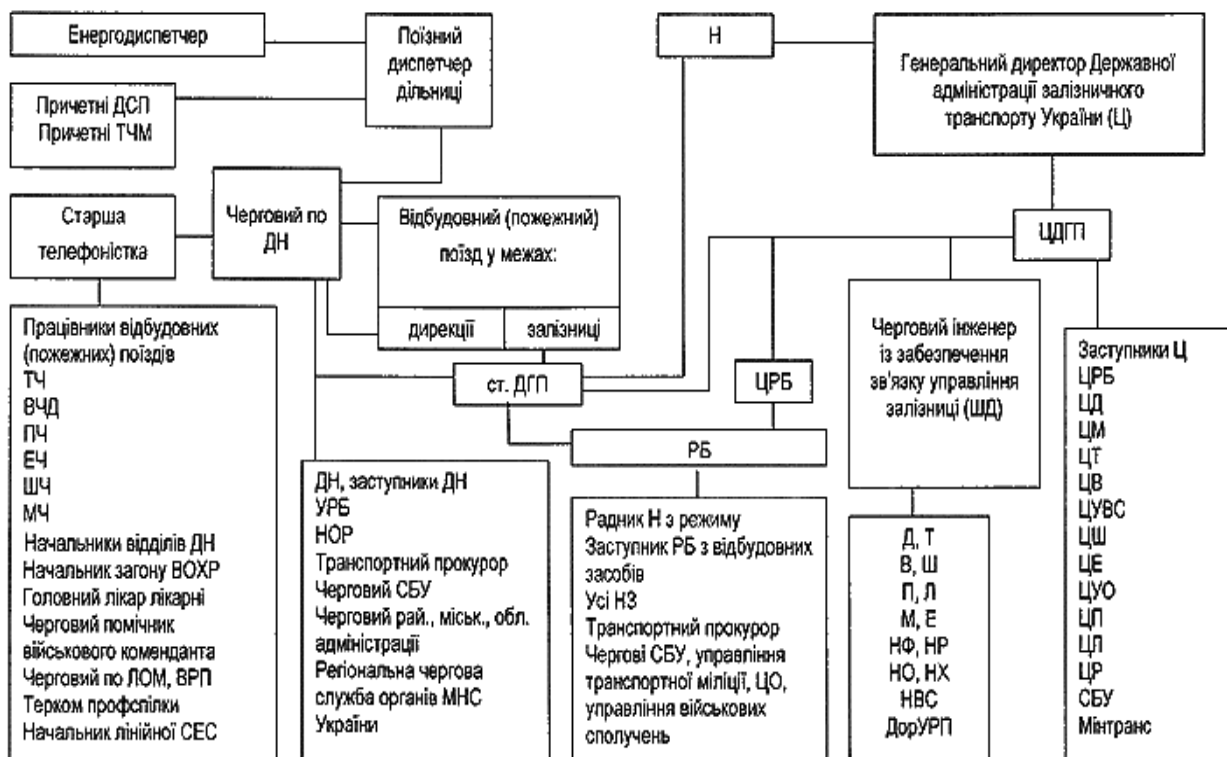


Рис. 3. Схема сповіщення про транспортні події на залізницях

Fig. 3. Annunciation scheme of transport events at railways

До таких завдань належать: охорона громадського порядку, забезпечення роботи пожежно-рятувальної і медичної служби, відправлення постраждалих із місця НС, упізнання

й ідентифікація загиблих, пошук, оповіщення, зустріч і розміщення родичів загиблих.

Вирішення вказаних вище завдань покладається на керівників штабу з ліквідації НС, пра-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

воохоронні органи й органи місцевого самоврядування.

Відповідно до вимог статутних документів, у ПАТ «Укрзалізниця» встановилася чітка схема управління підрозділами, які беруть участь у гасінні пожежі та проведенні аварійно-відновлювальних робіт (рис. 4).

Одним із структурних підрозділів апарату управління ПАТ «Укрзалізниця» є Департамент безпеки руху, завданнями якого є наступні: ведення обліку й здійснення аналізу причин катастроф, аварій, інцидентів, інших надзвичайних ситуацій й дорожньо-транспортних пригод, незаконних втручань у діяльність залізничного транспорту, контроль за розробленням і виконанням профілактичних заходів щодо їх попередження; перевірка готовності аварійно-відновних формувань регіональних філій ПАТ «Укрзалізниця» до ліквідації наслідків ката-

строф, аварій, інших транспортних подій та надзвичайних ситуацій [7, 9].

Для оперативного керування ліквідацією аварійної ситуації у дирекціях залізничних перевезень та управліннях залізниць створюють оперативні штаби за участю керівників провідних служб із залученням, у необхідних випадках, фахівців відправника або одержувача вантажу.

Керівники оперативних штабів разом із представниками аварійних служб територіальної підсистеми Єдиної державної системи цивільного захисту оперативно розробляють та виконують план реагування на аварійну ситуацію [5].

Виходячи зі структурної схеми (рис. 4), керівник ліквідації аварій (КЛА), який очолює оперативну групу, є першим рівнем керування.

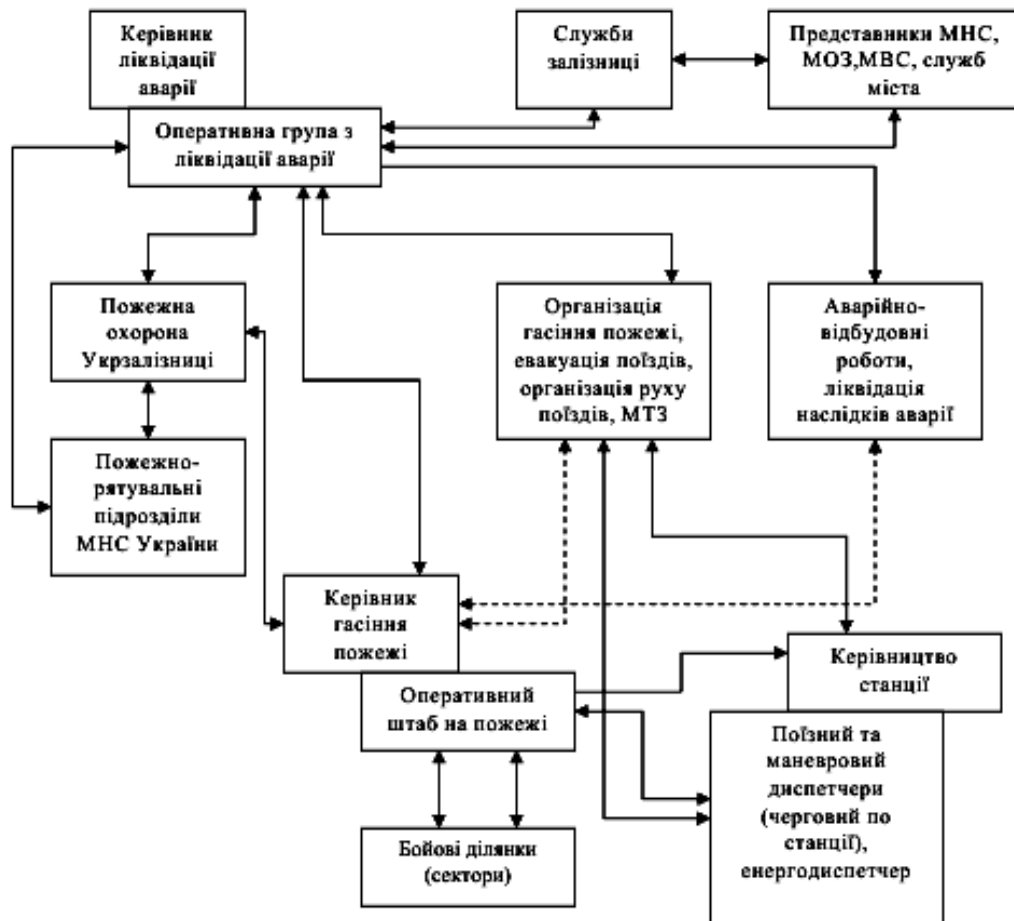


Рис. 4. Структурна схема управління підрозділами з гасіння пожеж та ліквідації аварій на залізниці

Fig. 4. The management block diagram of subdivisions for the fire extinguishing and elimination of accidents at railway

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

До другого рівня керування належать керівник гасіння пожежі (КГП) й оперативний штаб, які беруть участь у ліквідації аварії і здійснюють керування діями з гасіння пожежі.

До компетенції першого рівня керування належать наступні завдання:

- організація гасіння пожежі;
- евакуація людей, техніки й рухомого складу з небезпечних зон аварії;
- захист об'єктів і рухомого складу;
- розвідка місця небезпечної події;
- встановлення межі небезпечної зони й оповіщення населення;
- організація надання медичної допомоги постраждалим;
- вживання необхідних заходів безпеки під час проведення аварійно-відбудовних робіт;
- ліквідація наслідків аварії;
- відновлення руху поїздів;
- забезпечення дій пожежних підрозділів;
- залучення до проведення робіт підрозділів і формувань залізниці.

Особливе місце в розв'язанні цих завдань займає аналіз обстановки, яка склалася внаслідок аварії, що супроводжується пожежею. Важливими складовими такого аналізу обстановки є з'ясування первинної інформації про пожежу: місце пожежі, рухомий склад і вид вантажу, що горить, зовнішні ознаки пожежі, рухомий склад і вид вантажу в зоні пожежі, об'єкти й місцевість у зоні аварії [2].

На підставі первинної інформації КЛА із членами оперативного штабу розробляє сценарій можливого розвитку аварії, визначає параметри її небезпечних зон та встановлює об'єкти й рухомий склад залізничного транспорту, які знаходяться в цих зонах.

Виходячи з кількості об'єктів і рухомого складу, які потерпають від небезпечних факторів аварії, що супроводжується пожежею, визначають необхідну кількість пожежних підрозділів для гасіння пожежі, захисту об'єктів і рухомого складу, а також підрозділів і формувань залізниці для проведення аварійно-відбудовних робіт [13].

Завдання другого рівня безпосередньо пов'язані з організацією та вживанням заходів щодо ліквідації пожежі.

Під час гасіння пожежі на рухомому складі, вантажних і сортувальних станціях, із ураху-

ванням інформації про пожежу, отриманої в результаті розвідки, КГП зобов'язаний:

- встановити ступінь виконання працівниками залізничного транспорту заходів щодо відчеплення й відведення сусідніх вагонів та знеструмлення електричних мереж, а також отримати в енергодиспетчера письмове підтвердження про зняття напруги;
 - з'ясувати шляхи й способи прокладання рукавних ліній з урахуванням руху або маневрування поїздів;
 - з урахуванням особливостей залізничного транспорту призначити осіб, відповідальних за дотримання заходів безпеки;
 - встановити ступінь загрози сусіднім поїздам, можливість відведення усього рухомого складу або окремих вагонів, що горять, у безпечне місце;
 - організувати, якщо потрібно, захист і відведення вагонів, що не горять, із небезпечної зони, у першу чергу з людьми, вибуховими й отруйними вантажами, а також цистерн із легкозаймистими й горючими речовинами;
 - у разі розтікання рідини, що горить, організувати зведення земляної перешкоди або лотків для стікання цієї рідини у безпечне місце;
 - ужити заходів щодо захисту особового складу від отруєння токсичними речовинами [15].
- Усі ці завдання розв'язують у тісному взаємозв'язку між першим і другим рівнями керування.

Сукупність рішень, які приймають керівники ліквідації аварії й гасіння пожежі, складають ієрархію рішень, яка визначає структурні зв'язки між ними.

Очевидно, що для здійснення ефективного управління підрозділами (ділянками, секторами) необхідно, щоб рішення були узгоджені між собою як на одному, так і на різних рівнях керування. Велике значення має зміст рішень керівника ліквідації аварії, особливо на етапі визначення необхідної кількості пожежних підрозділів. Важливо також здійснювати контроль за виконанням наказів на усіх рівнях керування.

Наукова новизна та практична значимість

Результати, отримані в процесі дослідження, дозволяють розширити поняття «надзвичайна ситуація на залізничному транспорті». Визна-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

чено функції й завдання органів управління, сил і засобів функціональної підсистеми цивільного захисту із запобігання й реагування на загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій на державному, регіональному та об'єктовому рівні. Описано організацію взаємодії оперативних штабів, координувальних органів і сил цивільного захисту під час реагування на надзвичайні ситуації.

Урахування особливостей умов, в яких будуть виконуватись рятувальні й аварійно-відновлювальні роботи на залізничному транспорті, дозволить підвищити оперативність робіт й ефективність взаємодії органів управління й сил функціональної підсистеми запобігання та реагування на загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій.

Висновки

На основі аналізу причин транспортних подій на залізничному транспорті, у тому числі й під час перевезення небезпечних вантажів, можна зробити висновок, що значна частка цих подій відбувається через комерційні несправ-

ності, катастрофічний знос основних засобів. Але причинами виникнення надзвичайних подій на залізничному транспорті є також порушення вимог безпеки, які тягнуть за собою значну матеріальну шкоду.

Беручи до уваги набутий досвід організації й проведення аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідації надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті, пропонуємо в подальшому вдосконалювати систему оповіщення про загрозу й виникнення транспортних подій, оперативне реагування на ліквідацію їх наслідків, а також координацію й тісну взаємодію сил функціональної підсистеми запобігання і реагування на загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті в структурі Єдиної системи цивільного захисту.

Якісне підвищення безпеки руху поїздів, що обумовлено сучасними вимогами, можливе лише за умови вдосконалення елементів перевізного процесу: організаційно-технічного, технологічного, інформаційного, кадрового та т. ін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналітична доповідь: стратегічні напрями розвитку транспортної галузі України у післякризовий період. Розділ І. Транспортна система України у стратегії посткризового розвитку національної економіки / Національний інститут дослідження та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. – Київ, 2012. – С. 14–17.
2. Буц, Ю. В. Просторово-часовий аналіз надзвичайних подій при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом / Ю. В. Буц, О. В. Крайнюк, В. В. Барбашин // Вісн. Харк. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: «Екологія»: зб. наук. робіт. – Харків, 2017. – № 17. – С. 107–113.
3. Інструкція з організації відбудовних робіт при ліквідації наслідків транспортних подій на залізницях України: затв. наказом М-ва транспорту України від 27.04.2001 р. № 258 / М-во транспорту України. – Київ, 2001. – 18 с.
4. Куліш, Ю. О. Організація аварійно-рятувальних робіт при надзвичайних ситуаціях на залізничному транспорті: практ. посіб. / Ю. О. Куліш. – Харків: Федорко М. Ю., 2008. – 66 с.
5. Музикіна, С. І. Аналіз безпеки руху під час перевезення небезпечних вантажів на залізничному транспорті / С. І. Музикіна // Вісник акад. митної служби України. – 2014. – № 1 (51). – С. 135–139.
6. Положення про відбудовний поїзд залізниць України: ЦРБ 2. – Київ: Транспорт України, 1994. – 20 с.
7. Положення про єдину державну систему цивільного захисту [Електронний ресурс]: затв. постановою Каб. Міністрів України від 9 січ. 2014 р. № 11. – Київ, 2014. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF> – Назва з екрана. – Перевірено: 13.07.2018.
8. Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті [Електронний ресурс]: затв. наказом М-ва інфраструктури України від 03.07.2017 р. № 235 / М-во інфраструктури України. – Київ, 2017. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0904-17> – Назва з екрана. – Перевірено: 13.07.2018.
9. Правила безпеки та порядок ліквідації аварійних ситуацій з небезпечними вантажами при перевезенні їх залізничним транспортом: затв. наказом М-ва транспорту України від 16 жовт. 2000 р. № 567 / М-во транспорту України. – Київ, 2001. – 885 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

10. Статистичні дані про Українські залізниці [Електронний ресурс] / М-во інфраструктури України. – 2017. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zalznici.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 26.03.2018.
11. A VR-based the emergency rescue training system of railway accident / Jianxi Xu, Zhao Tang, Xiaolin Yuan, Yinyu Nie, Zong Ma, Xihui Wei, Jian J. Zhang // Entertainment Computing. – 2018. – Vol. 27. – P. 23–31. doi: 10.1016/j.entcom.2018.03.002
12. Batarliene, N. Analysis of the accidents and incidents occurring during the transportation of dangerous goods by railway transport / N. Batarliene, A. Jarašuniene // Transport. – 2014. – Vol. 29. – Iss. 4. – P. 395–400. doi: 10.3846/16484142.2014.983967
13. Hazard ranking for railway transport of dangerous goods in Canada / R. Macciotta, S. Robitaille, M. Hendry, C. D. Martin // Case Studies on Transport Policy. – 2018. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 43–50. doi: 10.1016/j.cstp.2017.11.006
14. Leitner, B. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis / B. Leitner // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – P. 150–159. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.361
15. Wang, D. Engineering accidents in society: A comparison of Chinese and American railway accident investigation / D. Wang, T. Zhang // Technology in Society. – 2015. – Vol. 43. – P. 69–74. doi: 10.1016/j.techsoc.2015.05.011

В. Г. ЛОЗА1*

¹*Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 81, эл. почта poluvagon017@gmail.com, ORCID 0000-0002-1864-5478

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Цель. Работа направлена на обобщение информации о современном состоянии и особенностях организации спасательных и неотложных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) на железнодорожном транспорте Украины. **Методика.** В процессе исследования использованы методы анализа для изучения содержания и основных положений отечественных и зарубежных научных публикаций, нормативно-правовых актов Украины и других источников о проведении спасательных и аварийно-восстановительных работ при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте. **Результаты.** С учетом положительного отечественного и зарубежного опыта в проведении спасательных и неотложных работ при ликвидации транспортных происшествий на железнодорожном транспорте в работе расширяются цели практического применения и взаимодействия органов управления и сил функциональной подсистемы предупреждения и реагирования на угрозу или возникновение чрезвычайных ситуаций. Выясняется возможность учета этих особенностей при планировании, организации и проведении аварийно-восстановительных работ при ликвидации последствий аварий и катастроф на железнодорожном транспорте. **Научная новизна.** Полученные результаты позволяют расширить понятие «чрезвычайная ситуация на железнодорожном транспорте». Определены функции и задачи органов управления, сил и средств функциональной подсистемы предупреждения и реагирования на угрозу или возникновение чрезвычайных ситуаций на государственном, региональном и объектовом уровне. Описаны организации взаимодействия оперативных штабов, координирующих органов и сил гражданской защиты во время реагирования на чрезвычайные ситуации. **Практическая значимость.** Учет особенностей условий, в которых будут выполняться спасательные и аварийно-восстановительные работы на железнодорожном транспорте, позволит повысить оперативность работ и эффективность взаимодействия органов управления и сил функциональной подсистемы предупреждения и реагирования на угрозу или возникновение чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации на железнодорожном транспорте; особенности организации; аварийно-восстановительные работы; оперативное реагирование; восстановительный поезд; пожарный поезд

V. G. LOZA^{1*}

^{1*}Dep. «Health and Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 81, e-mail poluvagon017@gmail.com, ORCID 0000-0002-1864-5478

ORGANIZATION PECULIARITIES OF ACCIDENT RECOVERY WORKS DURING EMERGENCY SITUATIONS AT RAILWAY TRANSPORT

Purpose. The work is aimed to generalize the information on the current state and organization peculiarities of the rescue and emergency works during the elimination of emergency situations at railway transport of Ukraine. **Methodology.** In the process of research, the analysis methods were used to study the content and main provisions of domestic and foreign scientific publications, normative legal acts of Ukraine and other sources on conducting accident recovery works during elimination of the emergency consequences at railway transport. **Findings.** Taking into account the positive domestic and foreign experience in conducting rescue and emergency works during elimination of transport accidents at railway transport, the aims of practical application and interaction of the administrating authorities and the forces of functional subsystem of prevention and response to the threat or occurrence of emergency situations are expanded in the work. It is determined the possibility to take these peculiarities into account when planning, organizing and performing accident recovery works during elimination of the emergency consequences at railway transport. **Originality.** The obtained results make it possible to widen the concept of "emergency situation at railway transport". The functions and tasks of administrating authorities, forces and means of the functional subsystem of prevention and response to the threat or occurrence of emergency situations at the state, regional and object level are determined. It was described the interaction organization of the emergency operations centers, coordinating organs and civil defense forces during response to emergency situations. **Practical value.** Taking into account the peculiarities of the conditions in which the rescue and accident recovery works will be carried out at railway transport will allow to increase the efficiency of works and interaction of administrating authorities and the forces of functional subsystem of prevention and response to the threat or occurrence of emergency situations.

Keywords: emergency situations at railway transport; organization peculiarities; accident recovery works; operational response; emergency train; fire train

REFERENCES

1. Analitichna dopovid: stratehichni napriamy rozvytku transportnoi haluzi Ukrainy u pislakryzovyi period. Rozdil I. Transportna systema Ukrainy u stratehii postkryzovoho rozvytku natsionalnoi ekonomiky. (2012). Natsionalnyi instytut doslidzhennia ta otsiniuvannia ekolohichnykh ryzykiv tekhnolohennoho pokhodzhennia. Kyiv. (in Ukrainian)
2. Buts, Y. V., Krainiuk, O. V., & Barbashyn, V. V. (2017). Prostorovo-chasovyi analiz nadzvychainykh podii pry perevezenni nebezpechnykh vantazhiv zaliznychnym transportom. Visnyk of the V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Ecology», 17, 107-113. (in Ukrainian)
3. Instruktssiia z orhanizatsii vidbudovnykh robot pry likvidatsii naslidkiv transportnykh podii na zaliznytsiakh Ukrainy : zatverdzheno nakazom Ministerstvava transportu Ukrainy vid 27.04.2001 r. № 258. Kyiv. (2001). (in Ukrainian)
4. Kulish, Y. O. (2008). Orhanizatsiia avariino-riatuvalnykh robot pry nadzvychainykh sytuatsiakh na zaliznychnomu transporti: praktychnyi posibnyk. Kharkiv: Fedorko M. Y. (in Russian)
5. Muzykina, S. I. (2014). Analiz bezpeky rukhu pid chas perevezennia nebezpechnykh vantazhiv na zaliznychnomu transporti. Visnyk akademii mytnoi sluzhby Ukrainy, 1(51), 135-139. (in Ukrainian)
6. Polozhennia pro vidbudovnyi poizd zaliznyts Ukrainy: TsRB 2 (1994). (in Ukrainian)
7. Polozhennia pro yedynu derzhavnu systemu tsyvilnoho zakhystu: zatverdzheno postanovoiu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 9 sichnia 2014 roku № 11 (2014). Retrived from: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF> (in Ukrainian)
8. Polozhennia pro klasyfikatsiiu transportnykh podii na zaliznychnomu transporti : zatverdzheno nakazom Ministerstva infrastruktury Ukrainy vid 03 lypnia 2017 roku № 235 (2017). Retrived from: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF> (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Pravyla bezpeky ta poriadok likvidatsii avariinykh sytuatsii z nebezpechnymy vantazhamy pry perevezenni yikh zaliznychnym transportom: zatverdzheno nakazom Ministerstva transportu Ukrainy vid 16 zhovtny 2000 roku № 567 (2001). (in Ukrainian)
10. Statystychni dani pro Ukrainski zaliznytsi. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy (2017). Retrived from: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zaliznici.html> (in Ukrainian)
11. Jianxi, Xu, Zhao, Tang, Xiaolin, Yuan, Yinyu, Nie, Zong, Ma, Xihui, Wei, & Jian, J. Zhang (2018). A VR-based the emergency rescue training system of railway accident. *Entertainment Computing*, 27, 23-31. doi: 10.1016/j.entcom.2018.03.002 (in English)
12. Batarliene, N. & Jarašuniene, A. (2014). Analysis of the accidents and incidents occurring during the transportation of dangerous goods by railway transport. *Transport*, 29(4), 395-400. doi: 10.3846/16484142.2014.983967 (in English)
13. Macciotta, R., Robitaille, S., Hendry, M. & Martin, C. D. (2018). Hazard ranking for railway transport of dangerous goods in Canada. *Case Studies on Transport Policy*, 6(4), 43-50. doi: 10.1016/j.cstp.2017.11.006 (in English)
14. Leitner, B. (2017). A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. *Procedia Engineering*, 187, 150-159. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.361 (in English)
15. Wang, D. & Zhang, T. (2015). Engineering accidents in society: A comparison of Chinese and American railway accident investigation. *Technology in Society*, 43, 69-74. doi: 10.1016/j.techsoc.2015.05.011 (in English)

Надійшла до редколегії: 26.04.2018

Прийнята до друку: 07.08.2018

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 621.33:621.333

T. P. PAVLENKO^{1*}, V. M. SHAVKUN^{2*}, V. I. SKURIKHIN^{3*}, N. P. LUKASHOVA^{4*}

^{1*}Dep. «Electric Transport», National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (095) 485 40 16, e-mail tpavlenkoskp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2356-4066

^{2*}Dep. «Electric Transport», National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (095) 142 90 00, e-mail vm.shavkun@gmail.com, ORCID 0000-0002-3253-1282

^{3*}Dep. «Electric Transport», National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (095) 745 31 77, e-mail vladscu@gmail.com, ORCID 0000-0001-7415-7105

^{4*}Dep. «Electric Transport», National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. тел. +38 (097) 255 73 80, e-mail lukashova.natalya@gmail.com, ORCID /0000-0002-5556-241X.

METHODOLOGY OF DETERMINING THE PARAMETERS OF TRACTION ELECTRIC MOTOR FAILURES WHEN OPERATING TROLLEYBUSES

Purpose. The work is aimed to study the change in parameters of traction electric motors of trolleybuses during operation and improvement of the technical state control system, using modern diagnostic methods. **Methodology.** Solution of the scientific problem is based on the control of technical state and change in the parameters of traction electric motors in the process of operation. For analysis of operational factors, we used the method of mathematical statistics and probability theory. Mathematical modelling and design of experiment, multifactor regression analysis provides an assessment of the reliability of the electric traction motor elements. Physical and statistical methods provide for research and detection of patterns of influence of the factors that accelerate the wear of parts. This allows us to generate models of system reliability that take into account the influence of operational factors on the reliability. **Findings.** As a result of the studies we obtained quantitative characteristics of the reliability of commutator and established that the failures of traction motors make up 20% of all failures of electrical equipment. We analysed the operation conditions of traction electric motors and determined the failure distribution law $N\{m_x, \sigma_x\}$, which allows assessing the progression between gradual failures. We obtained a mathematical model characterizing the object operation. A generalized equation of the failure rate of elements for traction electric motor (TEM) was found. We improved the estimation methods of reliability of TEM element base that makes it possible to determine the ETM lifetime taking into account the features of each trolleybus. We established the failure rate of commutators using physical and statistical methods. **Originality.** For the first time, the choice of physico-statistical methods of simulation and reliability calculation was substantiated. We determined the regularities of change in parameters of the trolleybus traction electric motor elements, which makes it possible to control the processes of their wear in the operation conditions. We developed a mathematical model for estimating the traction electric motor reliability, based on a system analysis of the probabilities of failures of subsystems to be diagnosed. **Practical value.** Based on the results of the study, we developed practical recommendations for rational choice of diagnostic parameters of traction motors. Their implementation at the enterprises of electric transport will increase reliability of electric motors in general up to 10%. It is proposed to use the results of the work in the educational process and in the research work of students at the Department of Electric Transport of the O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. The developed methodology for determination of parameters of traction electric motors when operating trolleybuses allows assessing the reliability of any type of trolleybus traction motor.

Keywords: electric transport; traction electric motor; diagnosing; operating reliability; failure rate

Introduction

Trolleybuses are equipped with traction electric motors of direct and alternating current, which determine the functional purpose of the rolling stock as a whole.

The main task of the operation of urban electric transport, in particular that of trolleybuses, is to ensure uninterrupted process of transportation of passengers, traffic safety on routes, as well as electrical safety.

Providing the appropriate level of reliability of traction electric motors is an urgent task that contributes to the efficiency of urban electric transport in general [1].

It is possible to obtain the solution of the problem by saving resources and controlling parameters in the process of the object operation. This can be achieved by ensuring the quality of maintenance and timely control of the relevant parameters of the traction electric motors while operating trolleybuses on routes. This set of tasks emphasizes the relevance of the work [1, 2].

Purpose

The main purpose of the work is to study the change in parameters of traction electric motors of trolleybuses during operation and improvement of the technical state control system, using modern diagnostic me.

According to the purpose of the work, the following tasks are defined:

- To study the parameters of traction electric motors of trolleybuses in the course of their operation, to obtain quantitative characteristics of the commutator reliability and to define the failure distribution laws;

- To establish the mathematical expectation of the time between failures of the commutator elements;

- To define the commutator wear rate distribution law;

- To develop the methods of failure prediction for trolleybus traction electric motor elements.

Solving these tasks will increase the operational reliability of trolleybus traction electric motors.

Methodology

The achievement of this purpose is based on the control of technical state and change in the pa-

rameters of traction electric motors in the process of operation.

Analysis of operational factors is carried out using methods of mathematical statistics and probability theory. To evaluate the reliability of traction electric motor elements, the method of mathematical modeling and the design of experiment are used.

The history of the development and improvement of methods for assessing reliability allows to distinguish two main stages: the study of statistical parameters and analysis of physico-statistical characteristics.

Comparison of methods in terms of accuracy of the obtained parameters and the adequacy of simulated processes makes it possible to highlight their features.

This allows us to form the system reliability models that take into account the influence of operational factors [1, 2].

The failures of traction electric motors largely depend on the properties of the design, materials, load modes and operating conditions. Quantitatively, they can be estimated by probabilistic-statistical characteristics.

A significant number of works is devoted to the issue of increasing the reliability of traction electric motors (TEM) of trolleybuses [3-5, 9, 12, 13]. However, most of them do not meet the necessary requirements to ensure maximum accuracy of assessment and forecast during the trolleybus operation.

To diagnose electric motors of trolleybuses, we determined the intensity of change in parameters, which contributes to the disturbance of switching of the motors due to the intense wear of the commutator. This phenomenon reflects a deterministic process.

In order to determine the intensity of wear of the traction electric motor commutators, we carried out the studies in the conditions of trolleybus operation in Ukraine. Herewith we took into account the geometry of the commutators and the state of the contact surface. These studies confirmed the well-known provisions on the random nature of the wear intensity of the commutator.

Based on the main property of inconsistent events, the sum of probabilities will be equal to one. If the random variable x is expanded at intervals, then it is possible to obtain probability characteristics, or the failure distribution law.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

According to the statistical analysis, we determined the characteristics of the mathematical expectations and the commutator wear intensity, taking into account the state of the contact surface [9, 12].

Findings

The studies have shown that in most cases, the wear of commutators obeys the Gaussian distribution law $N\{m_x, \sigma_x\}$. But the influence of operational

factors on the characteristics can vary with the running time. The form of the distribution of the commutator wear V_c from the probability of scattering of the stagnant failures will be the empirical dependencies shown in Fig. 1, with the corresponding parameters m_x and σ_x for different commutators.

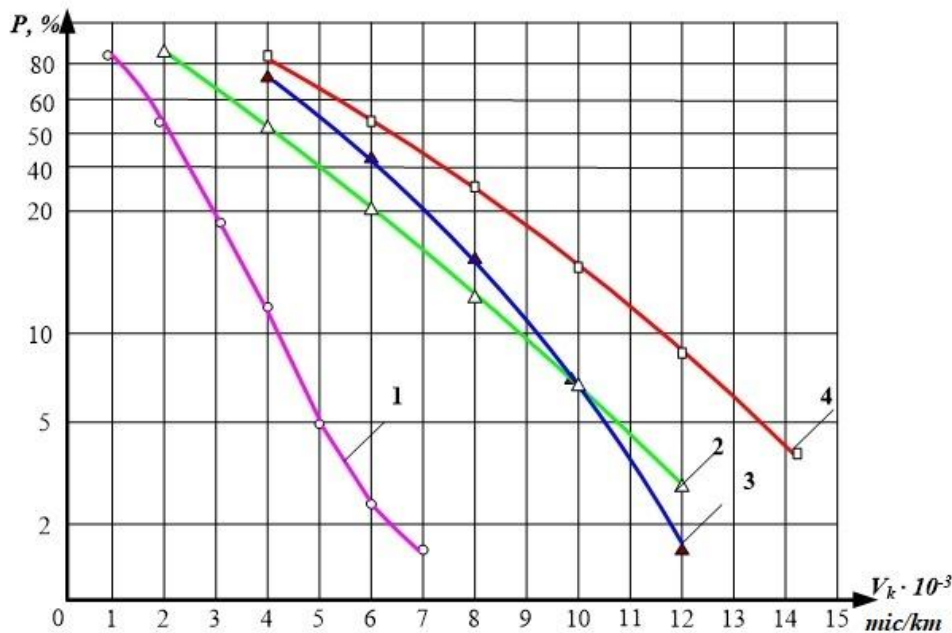


Fig. 1. Empirical dependencies of distribution of the commutator wear rate:
 1 – normal palette with black-out of plates; 2 – plate burning;
 3 – abrasive destruction of the oxide film;
 4 – circular and chaotic burning

If we accept the change in the commutator wear intensity as a diffusion process, then, after the end of the working period (in the stable period), it fluctuates relative to a certain level. The time between failures T in this case is determined by the formula [9, 12]:

$$T = \frac{\Delta H}{\int_0^{\infty} f(x) dx} \quad (1)$$

where ΔH – allowable value of wear, μm ; $f(x)$ – distribution density;

If the wear of the commutator is subject to the Gaussian law, then the formula will have as follows:

$$T = \frac{\Delta H}{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] dx}, \quad (2)$$

where σ – mean square deviation; x – a random variable; \bar{x} – average value of random variable.

Studying the dispersion of the parameter P and the characteristics of the commutator reliability, depending on the state, showed that the contact surface may have a varied colour and composition. The normal palette of plate surfaces has a uniform oxide film without traces of erosion. The plate black-out or chaotic burning shows the destruction of the contact surface by different schemes.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

In the case of plate burning there is oxide film destruction, which affects the commutation process and the reliability of the commutator unit. Results

of the study of pre-statistical characteristics of the commutator elements wear are shown in Fig. 2

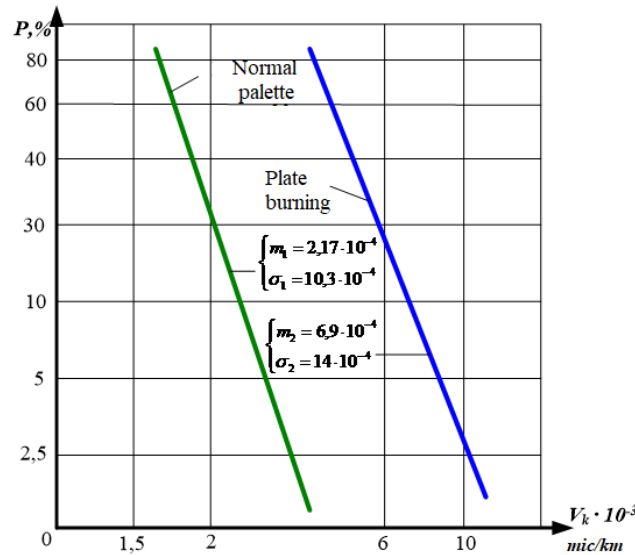


Fig. 2. Dependence of commutator reliability on the nature of its wear

Graphic dependencies demonstrate the significant influence of the plate burning on the dispersion of reliability characteristics.

In case of black-out or the normal state of the oxide film, the dispersion level is almost two times lower than that of commutators with plate burning.

In general, one can note the following: the level of dispersion of the gradual failure of the commutators is high, which requires the turning of the commutators and practically complicates the combination with planned types of technical inspections and repairs.

Practice shows that during TEM operation commutator turning is often performed. This is explained, as was shown earlier, by the magnitude of the spread of the mean time between failures.

The spread of the characteristics of wear is mainly determined by the state of the surface of the plates, the properties of the switching process, vibration. Accelerated wear of commutators requires premature turning, which is performed mainly during unscheduled repairs. Due to frequent grinding, this group of commutators prematurely runs its course.

But there is a group of commutators that has low wear intensity. In this case, grinding occurs during scheduled repairs when the parameters and condition of the commutator allow it to be used until the next scheduled repair, which involves re-

duction of the resource.

The results of studies are important, which is that the deformation of the commutator during operation is considered as a random process. This gives a qualitative estimate of the change in the commutator geometry under exploitation conditions.

The conducted studies allowed determining the laws of changing the commutator geometry, depending on the operating time and condition of the palette of different types of traction electric motors. This confirms the increase in the life of the commutators without having to be turned in the interval between repairs.

The degree of wear of the brushes depends on the state of the commutator working surface, the armature and pole winding and the insulation (switching stages).

The wear of the brushes is based on the fact that the destruction of individual areas of the friction surface and the separation of the material in the form of wear products is due to repeated interaction of the projections of rough friction surfaces. Interaction of friction surfaces is accidental. Consequently, the microgeometry can be determined only by means of the functions of the distribution of surface areas at the height by the reference curves.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Since the projections on surfaces have different height and shape, then the magnitude of the stresses and deformations that arise during the interaction will also be characterized by a certain spectrum. This allows us to determine that the process of destruction from weariness can be considered accidental.

The condition of friction pair «commutator-electrical brush» is characterized by a certain set of loads, speeds and other parameters that have a significant effect on their wear. Significant impact on wear is also caused by specific pressure of the brush springs on the brushes. As the practice of exploitation shows, the wear of electro-brushes of

different types has significant deviations of pre-statistical characteristics. The fig. 3 shows the graphic dependences of the of wear rate of the brushes of different types V on the probability of dispersion of the gradual failure of the brushes.

Taking into account the statistical data, we determined the mathematical expectation, the mean square deviation, and the variance of the intensity of the wear of the brushes [9, 12-14]. This makes it possible to make a comparative analysis of various variants of assembly units of commutators. However, in practice, the combination with planned types of technical inspections and repairs is complicated.

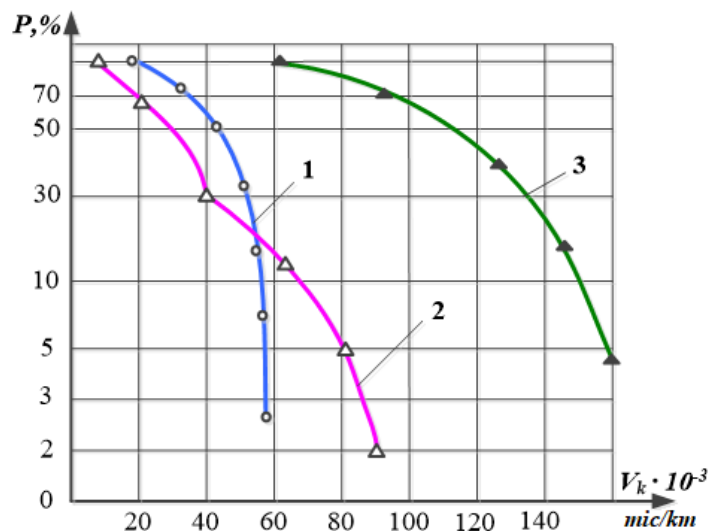


Fig. 3. Dependence of wear rate of the brushes of different types:
1 – wear distribution curve of EG-2A type brushes;
2 – wear distribution curve of EG-62 type brushes;
3 – wear distribution curve of EG-74C type brushes

The value of the mean square deviation of the wear intensity indicates a high degree of dispersion of the reliability parameters (see Fig. 3). From the given data it is seen that the time between failures is characterized by a high level of dispersion for uneven wear. This indicates that the failure of the brushes occurs between the repairs, which creates the preconditions for unscheduled work to eliminate failures and increases operating costs.

Thus, a decrease in the dispersion between failures will allow concentrating the change of brushes of ultimate wear on scheduled repairs.

As the practice of trolleybus traction electric motors shows, the failures of system elements can be caused by the inconsistency of load factors affecting the increased wear. Such influence extends

to each element of the system separately or together, and levels can take different values. Temporary and quantitative characteristics depend on operating conditions, under which such factors as ambient temperature, barometric pressure, pollution, frost, snow, etc. operate.

The factors that affect the elements of the traction electric motors include temperature, vibration, current, voltage, power, humidity, frequency of rotation; we denote them as $f_1 \dots f_7$. The part of these factors under operating conditions varies depending on load modes and affects accordingly the elements of traction electric motors.

The failure rate with factors of influence [9–12]:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\lambda_k(f_i) = k_i \exp\{c_i f_i\}, \quad (3)$$

where f_i – variable parameter depending on the operating conditions; c_i – load factor ($c_i = c_1 \dots c_7$);

k_i – coefficient with regard to the properties of the design of the traction electric motor, the state of gap in the joints of parts; $i = 1..7$ – influence fac-

tors with regard to current, vibration, power, voltage, etc.

The fig. 4 shows the dependence of the failure rate of the insulation for traction electric motors λ on the nominal value of the load mode f_{IH} . Dependencies are constructed for different implementations of the load factor c ($c_1 = 0.073$; $c_2 = 0.146$; $c_3 = 0.219$; $c_4 = 0.299$; $c_5 = 0.365$; $c_6 = 0.438$; $c_7 = 0.511$).

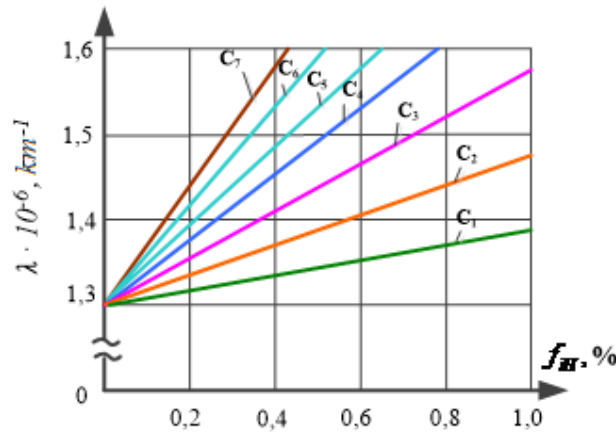


Fig. 4. Dependences of failure rate of the traction electric motor isolation λ on the nominal value of loading mode f_{IH} and various realizations of the load factor c

The shown factors are independent and operate simultaneously. Failure of an element due to one of the factors leads to system failure.

The dependence of the failure rate of the traction electric motor element on the failure rate by factors is taken linear and has the form:

$$\lambda(f_1 \dots f_7) = \lambda_k(f_1) \lambda_k(f_2) \dots \lambda_k(f_7),$$

or

$$\lambda_k(f_1 \dots f_7) = \prod_{i=1}^7 \lambda_k(f_i), \quad (4)$$

Numerous studies [3–8, 10–12] and operational data show the distribution law for the probability of failure-free operation for some elements of the traction electric motor. For relaxation failures in time t this is a product with the parameter λ_k . This parameter is determined taking into account the normal law of the distribution of failures $N\{m_k, s_k\}$. $E(\lambda_k; t)$ Then the reliability of $P_k(t)$ element for the independence of the parametric and the relaxation $N(m_k; s_k; t)$ failures will be equal to the product:

$$P_k(t) = E(\lambda_k; t) N(m_k; \sigma_k; t), \quad (5)$$

where $E(\lambda_k; t) = \exp\{\lambda_k t\}$

$$N(m_k; \sigma_k; t) = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{H/T} \exp\left\{-\frac{(x - m_k)^2}{2\sigma_k^2}\right\} dx.$$

$$P_k(t) = E(\lambda_{kH}; t) N(t; m_{kH}; \sigma_{kH}) \quad (6)$$

Based on the data (see Fig. 4), for the given value of the load factor c , the reliability characteristics for the assembly element are calculated:

$$m_1 = 3.8 \cdot 10^{-4}; \sigma_1 = 5 \cdot 10^{-4}; c_1 = 0.776;$$

$$m_2 = 1.1 \cdot 10^{-4}; \sigma_2 = 1.7 \cdot 10^{-4}; c_2 = 0.742;$$

$$m_3 = 1.7 \cdot 10^{-4}; \sigma_3 = 2.6 \cdot 10^{-4}; c_3 = 0.736.$$

From the given dependencies it is clear that the parameters of the composite structure of the model significantly affect the reliability of the traction electric motor.

For $m_k = m_{kH}$; $\sigma_k = \sigma_{kH}$; $\lambda_k = \lambda_{kH}$ the equation (5) will look as follows:

Expression of the failure rate for a particular structural scheme of an element will have the form:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\lambda_k(f_1, \dots, f_m) = \lambda(t).$$

By making the appropriate substitution, we can obtain the equation [16–18]:

$$\lambda_k(t; f_1; f_2; \dots; f_7) = k \frac{1}{M_m} \ln^{-1} \{d_3 f_3\} \times \exp \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i, j \neq 3 \\ i < j}}^7 d_{ij} f_i f_j \left[k - \frac{dN(t; m_k; \sigma_r)}{dt} \right] \frac{1}{N(t; m_k; \sigma_k)}, \quad (7)$$

where k is the coefficient taking into account the properties of the traction electric motor design, namely the state of the gap in the part joints; M_n is a mathematical expectation;

The obtained dependences for various load factors indicate that the effect on the failure rate for a particular structural scheme of the element λ_k is not the same (Fig. 5). In the general case, the equation that binds the failure rate, the probability of failure-free operation and derivative, depends on the load factors and may have the following form:

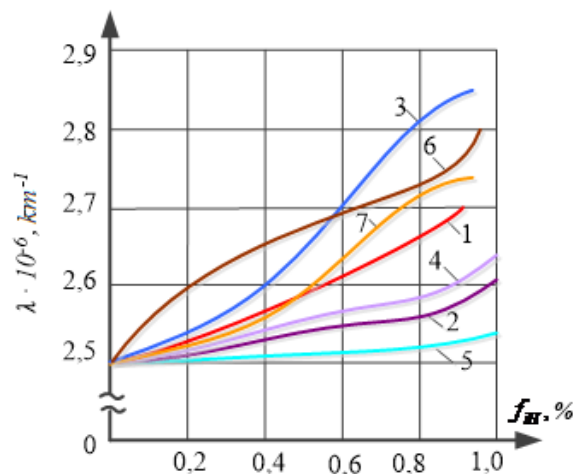


Fig. 5. Influence of load modes on the failure rate of insulation of armature winding for electric motors λ against the nominal value of load mode f_{Hl} : the curves 1–7 are load factors

We will show this for the insulation of armature winding when determining the dependence of the probability of failure-free operation of a system element on the base space elements. To do this from the factor space elements we select the base space elements.

Let us suppose: g_1 is the flow rate of the cooling air from 0 to 80 m³/min; g_2 is the voltage from 0 to 700 V; g_3 is the current of 0 to 720 A; g_4 is the air humidity of 98 %.

$$\lambda_k(t; f_1; f_2; \dots; f_7) = -\frac{1}{P_k(t_0; f_1, \dots, f_7)} \frac{dP_k(t_0; f_1, \dots, f_7)}{dt} \quad (8)$$

Thus, we have an important condition under which the expression connects the failure rate with the parameters of the load element.

To diagnose the technical condition of the turn and main insulation we take into account the parameter change processes under the influence of the heating temperature. The combination of changes in the factors influences the level and nature of the TEM load.

During the study of the reliability of the traction motor during operation, it is important to provide an opportunity to analyze the reliability of the insulation, taking into account the number of available factors.

Therefore, it is important to have such a research scheme that would cover, if possible, factors that are not significant, but in aggregate have a great influence on the assessment of reliability parameters.

In the process of research, there are some difficulties in choosing the main factors. Thus, the temperature depends on the insulation, which depends on the electrical, magnetic, mechanical losses, and they, in turn, depend on the current, air flow, the frequency of the armature rotation, etc. If we take into account that they are correlated with each other to varying degrees, then the formalization of the process will not take place. Therefore, only factors of direct influence are taken into ac-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

count, in particular the temperature of heating of insulation, etc.

The method of multivariable regression analysis in the presence of statistics that characterizes the work of the object, allowed us to obtain a regression model of temperature dependence on the base space elements and load modes, taking into account the effects of pressure:

$$f_1 = d_3 g_3 + d_1 g_1 + d_1 x + d_3 g_3 + d_{11} g_1^2 + b^2 + d_{11} x^2 + d_{13} g_3 g_1 - d_3 g_3 - d_3 d_1 g_3 x + d_1 x + b_3, \quad (9)$$

where x is a random variable that has the form of the dependence of the rotational frequency on the voltage g_2 . Then there will be an expression:

$$f_1 = d_1 g + d_2 k g_2 + g_3 + g_1^2 + k^2 g_2^2 + g_3^2 + g_1 g_3 - g_3 - k g_2 g_3 - g_1 - k g_2 g_1 + k g_2. \quad (10)$$

By summing the similar and transforming the right side (10) we obtain the equation:

$$f_1 = u_1 g_2 + u_2 k g_2 + u_3 g_3 + u_4 g_1^2 + u_5 k^2 g_2^2 + u_6 g_3^2 - u_7 g_1 g_2 - u_8 k g_2 g_3 + u_9 g_1 g_3 + u_0, \quad (11)$$

where $u_0 \dots u_9$ are the factor space elements.

The equation (11) characterizes the dependence of temperature as an element of the factor space on the strength of current, the flow of cooling air and voltage.

Similarly to the vibration parameter, depending on the frequency of the armature rotation, we have:

$$f_2 = k = k_1 k g_2, \quad (12)$$

Substituting the obtained expressions into the basic equation (7) of the element failures rate, we obtain a generalized equation:

$$\lambda_k(t; g_1 \dots g_4) = \frac{k}{M_n} \ln^{-1} \left(1 + d_1 g_1^B \right) \exp \left\{ \sum_{\substack{i=2 \\ j=2 \\ i < j}} d_{ij} g_i^B g_j^B \right\} \times \left[k + \left(- \frac{dN(t; m_k; \sigma_k)}{dt} \frac{1}{N(t; m_k; \sigma_k)} \right) \right], \quad (13)$$

From equation (13) we find the characteristics of the failure rate against the factors by solving the differential equations of the form:

$$\lambda_k(t; g_1 \dots g_4) = \frac{1}{P_k(t; g_1 \dots g_4)} \frac{dP_k(t; g_1 \dots g_4)}{dt}. \quad (14)$$

Thus we obtained the dependences of the probability of failure-free operation on the temperature and load modes.

The calculation of reliability made it possible to estimate the level of the system element failure rate, which is $\lambda = 1.29 \times 10^{-6} km$. The failure rate when exceeding the factor levels by 1.5 times gives the magnitude of the failure rate $\lambda = 2.23 \times 10^{-6} km$.

The obtained results show that in the presence of exploitation data, it is possible to predict the failure rate by calculation and, based on the given service life, to predict the probability of failure-free operation.

Consequently, it is possible to predict the failure rate of all elements of traction electric motors without exception and by using compositional models to determine the reliability of the whole system.

Rational choice of diagnostic parameters of traction motors will increase their reliability in general up to 10%.

The conducted researches provide the basis for further development of the calculation-experimental method for estimating the parameters of the maintenance system of trolleybus traction electric motors, which reached the end of their assigned service life.

The proposal for practical use of the method of structural and functional analysis of the reliability of the traction electric motor elements allowed for the particular structural assembly to obtain adequate estimates of the reliability parameters [9, 12].

These methods allow making a calculation of pre-statistical characteristics parameters of failures and damages of parts and units, on the basis of which it becomes possible to adjust the parameters of inter-repair runs of the trolleybus traction electric motor as a whole.

Originality and practical value

For the first time, the choice of physico-statistical methods of simulation and reliability calculation was substantiated. We determined the regularities of change in parameters of the trolley-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

bus traction electric motor elements, which makes it possible to control the processes of their wear in the operation conditions. We developed a mathematical model for estimating the traction electric motor reliability, based on a system analysis of the probabilities of failures of subsystems to be diagnosed.

Based on the results of the study, we developed practical recommendations for rational choice of diagnostic parameters of traction motors. Their implementation at the enterprises of electric transport will increase reliability of electric motors in general up to 10%.

It is proposed to use the results of the work in the educational process and in the research work of students at the Department of Electric Transport of the O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

The developed methodology for determination of parameters of traction electric motors when operating trolleybuses allows to assess the reliability of any type of trolleybus traction motor.

Conclusions

1. As a result of the conducted research we obtained the quantitative characteristics of the commutator reliability. It has been established that the failure of traction motors make up 20% of all failures of electric equipment. Conditions of operation

of traction electric motors were analysed. We determined the failure distribution law $N \{m_x, \sigma_x\}$, which allows assessing the progression between gradual failures.

2. We obtained the mathematical model (9) using the multi-factor regression analysis method in the presence of statistics. This model characterizes the work of the object. We also obtained the generalized equation of the failure rates (13) of the TEM elements. We improved the method of estimating the reliability of the elemental base of traction electric motors. The obtained solution allows to determine the TEM service life taking into account the characteristics of each trolleybus.

3. We established the intensity of commutator wear using the distribution law. The calculation of reliability parameters allowed to estimate the level of the system element failure rate. In case of excess of the wear intensity factors by 1.5 times the parameter $\lambda = 1.29 \times 10^{-6} (km)$ is changed by the value of $\lambda = 2.23 \times 10^{-6} (km)$.

4. The use of composite models and necessary calculation methods will allow to predict the failure of elements of the trolleybus traction electric motors. Practical recommendations, taking into account the research results, will increase the reliability of TEM up to 10%.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Есаулов, С. М. Исследование и разработка зарядного устройства суперконденсатора при рекуперации энергии торможения электропривода на транспорте / С. М. Есаулов, О. Ф. Бабичева, Н. П. Лукашова // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура : наук.-техн. зб. / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2017. – Вип. 135. – С. 132–140.
2. Правила експлуатації міського електричного транспорту : навч. посіб. / В. Х. Далека, В. Б. Будниченко, В. І. Коваленко, М. В. Хворост, Л. О. Ісаєв ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 447 с.
3. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С. И. Лукьянов, А. С. Карандаев, С. А. Евдокимов [и др.] // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1 (45). – С. 129–136.
4. Розробка енергомеханічної установки для тяги електромобіля / Д. Ю. Зубенко, А. В. Коваленко, О. М. Петренко, В. М. Шавкун, М. Ю. Олехно // Science Rise. – 2016. – Т. 10, № 2 (27). – С. 6–15. doi: 10.15587/2313-8416.2016.79196
5. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. – Харків : ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2018. – 370 с.
6. Скурихин, В. И. Моделирование изнашивания поверхностей трения узлов и деталей машин / В. И. Скурихин // Проблемы та перспективи розвитку технічних засобів транспорту та систем автоматизації : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. – Харків, 2014. – С. 42–43.
7. Сорока, К. О. Змістовна модель та рівняння руху електричного транспорту / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 97–106. doi: 10.15802/stp2015/46056

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Сорока, К. О. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів електротранспорту з метою зменшення витрат електроенергії / К. О. Сорока, Т. П. Павленко, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 77–91. doi: 10.15802/stp2017/104360
9. Технічна експлуатація міського електричного транспорту : навч. посіб. / В. Х. Далека, В. Б. Будниченко, Е. І. Карпушин, В. І. Коваленко ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 236 с.
10. Шавкун, В. М. Визначення оптимальних режимів діагностування транспортних засобів [Electronic resource] / В. М. Шавкун, О. В. Мізак // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2017. – № 12. – С. 193–198. – Режим доступу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_2/5.2.pdf – Назва з екрана. – Перевірено : 23.06.2018.
11. Шавкун, В. Діагностування тягових електричних машин електротранспорту / В. Шавкун // Вост.-Европ. журн. передових технологій. – 2014. – Т. 1, № 7 (67). – С. 48–53.
12. Яцун, М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів / М. А. Яцун, А. М. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – 228 с.
13. Identification of induction machine parameters using only no-load test measurements / M. Aminu, P. K. Aina, M. Abana, U. A. Abu // Nigerian Journal of Technology. – 2018. – Vol. 37. – Iss. 3. – P. 742–748. doi: 10.4314/njt.v37i3.25
14. Kolcio, K. Model-based off-nominal state isolation and detection system for autonomous fault management / K. Kolcio, L. Fesq // IEEE Aerospace Conference Proceedings. – 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500793
15. Kuznetsov, A. Resource saving reserves of determining characteristics of the long steering wall of wagon of the metro / A. Kuznetsov, V. Skurikhin, V. Shavkun // EUREKA: Physical Sciences and Engineering. – 2018. – Vol. 1. – P. 19–28. doi: 10.21303/2461-4262.2018.00525
16. Pavlenko, T. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport / T. Pavlenko, V. Shavkun, A. Petrenko // Eastern-European Journal of Enterpraise Technologies. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 8 (89). – P. 22–30. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112109
17. Zubenko, D. Designing intelligent systems management transport enterprises entropy approach / D. Zubenko, A. Kuznetsov // EUREKA: Physics and Engineering. – 2016. – Vol. 1. – P. 49–54. doi: 10.21303/2461-4262.2016.00025

Т. П. ПАВЛЕНКО^{1*}, В. М. ШАВКУН^{2*}, В. І. СКУРІХІН^{3*}, Н. П. ЛУКАШОВА^{4*}

^{1*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (095) 485 40 16, ел. пошта travlenkoskp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2356-4066

^{2*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (095) 142 90 00, ел. пошта vm.shavkun@gmail.com, ORCID 0000-0002-3253-1282

^{3*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (095) 745 31 77, ел. пошта vladscu@gmail.com, ORCID 0000-0001-7415-7105

^{4*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (095) 745 31 77, ел. пошта lukashova.natalya@gmail.com, ORCID 0000-0002-5556-241X

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДМОВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРОЛЕЙБУСІВ

Мета. У роботі необхідно провести дослідження зміни параметрів тягових електричних двигунів (ТЕД) троллейбусів у процесі експлуатації й удосконалення системи керування технічним станом за допомогою використання сучасних методів діагностування. **Методика.** Розв’язання наукової задачі базується на процедурі контролю технічного стану й зміни параметрів тягових електричних двигунів у процесі експлуатації. Для аналізу експлуатаційних факторів застосовано метод математичної статистики й теорії ймовірності. Математичне моделювання й планування експерименту, багатфакторний регресійний аналіз дає оцінку надійності елементів тягових

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

електричних двигунів. Фізико-статистичні методи передбачають дослідження й виявлення закономірностей впливу факторів, які прискорюють знос деталей. Це дозволяє сформулювати моделі надійності системи, що враховують вплив експлуатаційних факторів на надійність. **Результати.** Авторами у результаті проведених досліджень отримано кількісні характеристики надійності колекторно-щіткового вузла та встановлено, що відмови тягових двигунів складають 20 % від усіх відмов електрообладнання. Проаналізовано умови експлуатації тягових електричних двигунів і визначено закон розподілу відмов $N\{m, \sigma\}$, що дозволяє оцінити напрацювання між поступовими відмовами. Отримано математичну модель, яка характеризує роботу об'єкта під час експлуатації. Знайдено узагальнене рівняння інтенсивності відмов елементів тягових електродвигунів. Удосконалено методи оцінки надійності елементної бази тягових електродвигунів, яка дозволяє визначити ресурс ТЕД із урахуванням особливостей кожного тролейбуса. Встановлено інтенсивність зносу колекторів із використанням фізико-статистичних методів. **Наукова новизна.** Уперше обґрунтовано вибір фізико-статистичних методів моделювання й розрахунку надійності. Встановлено закономірності зміни параметрів елементів тягових електродвигунів тролейбусів, що дає можливість контролювати процеси їх зношування в умовах експлуатації. Створено математичну модель оцінки надійності тягового електричного двигуна, яка базується на системному аналізі ймовірностей відмов підсистем, що підлягають діагностуванню. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів дослідження розроблено практичні рекомендації щодо раціонального вибору діагностичних параметрів тягових двигунів. Їх реалізація на підприємствах електротранспорту дозволить підвищити надійність електричних двигунів у цілому до 10 %. Запропоновано використовувати результати роботи в навчальному процесі та в науково-дослідницькій роботі студентів на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Розроблена методологія визначення параметрів тягових електричних двигунів під час експлуатації тролейбусів дозволяє проводити оцінку надійності будь-якого типу тягового двигуна тролейбуса.

Ключові слова: електричний транспорт; тяговий електричний двигун; діагностування; експлуатаційна надійність; інтенсивність відмов

Т. П. ПАВЛЕНКО^{1*}, В. М. ШАВКУН^{2*}, В. І. СКУРИХИН^{3*}, Н. П. ЛУКАШОВА^{4*}

^{1*}Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (095) 485 40 16, эл. почта travlenkoskp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2356-4066

^{2*}Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (095) 142 90 00, эл. почта vm.shavkun@gmail.com, ORCID 0000-0002-3253-1282

^{3*}Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (095) 745 31 77, эл. почта VLADSCU@gmail.com, ORCID 0000-0001-7415-7105

^{4*}Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (095) 745 31 77, эл. почта lukashova.natalya@gmail.com, ORCID /0000-0002-5556-241X

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Цель. В работе необходимо провести исследование изменения параметров тяговых электродвигателей (ТЭД) троллейбусов в процессе эксплуатации и совершенствования системы управления техническим состоянием посредством использования современных методов диагностики. **Методика.** Решение научной задачи базируется на процедуре контроля технического состояния и изменения параметров тяговых электрических двигателей в процессе эксплуатации. Для анализа эксплуатационных факторов применен метод математической статистики и теории вероятности. Математическое моделирование и планирование эксперимента, многофакторный регрессионный анализ дает оценку надежности элементов тяговых электрических двигателей. Физико-статистические методы предусматривают исследования и выявления закономерностей влияния факторов, которые ускоряют износ деталей. Это позволяет сформировать модели надежности системы, учитывающие влияние эксплуатационных факторов на надежность. **Результаты.** Авторами в резуль-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тате проведенных исследований получены количественные характеристики надежности коллекторно-щеточного узла и установлено, что отказы тяговых двигателей составляют 20 % от всех отказов электрооборудования. Проанализированы условия эксплуатации тяговых электрических двигателей и определен закон распределения отказов $N \{m, \sigma_x\}$, что позволяет оценить наработки между постепенными отказами. Получена математическая модель, которая характеризует работу объекта во время эксплуатации. Найдено обобщенное уравнение интенсивности отказов элементов тяговых электродвигателей. Усовершенствованы методы оценки надежности элементной базы тяговых электродвигателей, которая позволяет определить ресурс ТЭД с учетом особенностей каждого троллейбуса. Установлена интенсивность износа коллекторов с использованием физико-статистических методов. **Научная новизна.** Впервые обоснован выбор физико-статистических методов моделирования и расчета надежности. Установлены закономерности изменения параметров элементов тяговых электродвигателей троллейбусов, что дает возможность контролировать процессы их износа в условиях эксплуатации. Создана математическая модель оценки надежности тягового электрического двигателя, которая базируется на системном анализе вероятностей отказов подсистем, подлежащих диагностированию. **Практическая значимость.** На основе полученных результатов исследования разработаны практические рекомендации по рациональному выбору диагностических параметров тяговых двигателей. Их реализация на предприятиях электротранспорта позволит повысить надежность электрических двигателей в целом до 10 %. Предложено использовать результаты работы в учебном процессе и в научно-исследовательской работе студентов на кафедре электрического транспорта Харьковской национальной академии городского хозяйства имени А. Н. Бекетова. Разработанная методология определения параметров тяговых электрических двигателей при эксплуатации троллейбусов позволяет проводить оценку надежности любого типа тягового двигателя троллейбуса.

Ключевые слова: электрический транспорт; тяговый электрический двигатель; диагностирование; эксплуатационная надежность; интенсивность отказов

REFERENCES

1. Esaulov, S. M., Babicheva, O. F., & Lukashova, N. P. (2017). Research and development of the charger of a supercapacitor for the recovery of braking energy of an electric drive in transport. *Municipal economy of cities. Series: «Engineering science and architecture»*, 135, 132-140. (in Russian)
2. Daleka, V. K., Budnychenko, V. B., Kovalenko, V. I., Khvorost, M. V., & Isaiev, L. O. (2014). Pravyla ekspluatatsii miskoho elektrychnoho transportu: Navchalnyi posibnyk. Kharkiv: KhNUMH. (in Ukrainian)
3. Lukyanov, S. I., Karandaev, A. S., & Yevdokimov, S. A. (2014). Razrabotka i vnedrenie intellektualnykh sistem diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektri-cheskogo oborudovaniya. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, 1(45), 129-136. (in Russian)
4. Zubenko, D. Y., Kovalenko, A. V., Petrenko, O. M., Shavkun, V. M., & Olekhno, M. Y. (2016). Rozrobka enerhomekhanichnoi ustanovky dlia tiahyy elektromobilia. *Science Rise*, 10, 2(27), 6-15. doi: 10.15587/2313-8416.2016.79196 (in Ukrainian)
5. Daleka, V. K., Khvorost, M. V., Skurikhin, V. I., & Skurikhin, D. I. (2018). *Rukhomyi sklad miskoho elektrychnoho transportu. Mekhanichna chastyna: Navchalnyi posibnyk*. Kharkiv: KhNUMH imeni O. M. Beketova. (in Ukrainian)
6. Skurikhin, V. I. (2014). Modelirovaniye iznashivaniya poverkhnostey treniya uzlov i detaley mashin. *Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh zasobiv transportu ta system avtomatyzatsii: Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*, 42-43. (in Russian)
7. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2015). The content model and the equations of motion of electric vehicle. *Science and Transport Progress*, 3(57), 97-106. doi: 10.15802/stp2015/46056 (in Ukrainian)
8. Soroka, K. O., Pavlenko, T. R., & Lychov, D. A. (2017). System for automatic selection of the speed rate of electric vehicles for reducing the power consumption. *Science and Transport Progress*, 3(69), 77-91. doi: 10.15802/stp2017/104360 (in Ukrainian)
9. Daleka, V. K., Budnychenko, V. B., Karpushyn, E. Y., & Kovalenko, V. I. (2014). *Tekhnichna ekspluatatsiia miskoho elektrychnoho transportu: Navchalnyi posibnyk*. Kharkiv: KhNUMH. (in Ukrainian)
10. Shavkun, V. M., Miziak, O. V. (2017). Vyznachennia optimalnykh rezhymiv diahnostuvannia transportnykh zasobiv. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii*, 12, 193-198. Retrieved from http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_2/5.2.pdf (in Ukrainian)
11. Shavkun, V. M. (2014). Diagnostics of electric transport traction electric machines. *Eastern-European Journal of Enterpraise Technologies*, 1, 7(67), 48-53. (in Ukrainian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

12. Yatsun, M. A., & Yatsun, A. M. (2010). *Ekspluatatsiia ta diahnostuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ*. Lviv: Lvivska politekhnika. (in Ukrainian)
13. Aminu, M., Aina, R. K., Abana, M., & Abu, U. A. (2018). Identification of induction machine parameters using only no-load test measurements. *Nigerian Journal of Technology*, 37(3), 742. doi: 10.4314/njt.v37i3.25 (in English)
14. Kolcio, K., & Fesq, L. (2016). Model-based off-nominal state isolation and detection system for autonomous fault management. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. doi: 10.1109/AERO.2016.7500793 (in English)
15. Kuznetsov, A., Skurikhin, V., & Shavkun, V. (2018). Resource saving reserves of determining characteristics of the long steering wall of wagon of the metro. *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*, 1, 19-28. doi: 10.21303/2461-4262.2018.00525 (in English)
16. Pavlenko, T., Shavkun, V., & Petrenko, A. (2017). Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 8(89), 22-30. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112109 (in English)
17. Zubenko, D., & Kuznetsov, A. (2016). Designing intelligent systems management transport enterprises entropy approach. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 49-54. doi: 10.21303/2461-4262.2016.00025 (in English)

Received: April 11, 2018

Accepted: July 30, 2018

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

UDC 624.953.014.2.004.15

S. N. SEMENETS^{1*}, S. S. NASONOVA^{2*}, G. I. SEMENETS^{3*}

^{1*}Dep. «Applied Mathematics and Information Technologies», Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernishevskiy St., 24-A, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (067) 639 60 64, e-mail Ssemenets28@gmail.com, ORCID 0000-0002-6359-1069

^{2*}Dep. «Higher Mathematics», Ukrainian State Chemical-Technological University, Gagarin Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (097) 940 98 56, e-mail ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID 0000-0002-0920-7417

^{3*}Dep. «Higher Mathematics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 879 48 19, e-mail semga1952@gmail.com, ORCID 0000-0003-2693-3282

OPTIMAL STRUCTURAL RESERVATION OF TECHNICAL SYSTEMS

Purpose. The purpose of the article is to give designers of highly reliable technical systems that do not have special knowledge in the field of optimization and programming skills, a simple and accessible mathematical tool for choosing the optimal solution for structural redundancy of systems. **Methodology.** The article poses the problem of optimal structural redundancy of technical systems. Two typical redundancy schemes are considered: a) a separate «hot» backup scheme; b) a separate «cold» backup scheme. The computational models for estimating the reliability of redundant systems are formulated. We offer optimization models that allow us to find a rational option for reserving a system that is being designed, taking into account conflicting requirements for its reliability and cost. These models are numerically implemented in the operating environment of the Excel spreadsheet as applied to the main object, consisting of 7 elements. The optimal variants of reserving this object according to the «hot» and «cold» separate reservation schemes are given. **Findings.** Calculated models for estimating reliability, as well as models for optimizing the systems reserved for the «hot» and «cold» separate backup schemes, have been developed. With the use of the Excel spreadsheet, the optimal options for reserving 7 element objects are found for separate «hot» and «cold» backups. **Originality.** New computational models for estimating the reliability of redundant systems are proposed, as well as optimization models developed on the basis of these, which are formulated using the decomposition of unknown initial problem of structural redundancy into binary components. In this case, the obtained optimization models belong to the class of problems of non-linear mathematical programming with binary variables, for the numerical solution of which (even for a sufficiently large dimension) well-known packages of applied computer programs, in particular, the MS Excel spreadsheet, are well adapted. Thus, the process of solving the initially very complicated problem of optimal structural redundancy is much simpler and reduced to performing elementary actions in the corresponding software interfaces. **Practical value.** The proposed calculation models for estimating the reliability of redundant systems, models for optimal structural redundancy, and the methodology for their formation, in order to simplify further numerical implementation, can be useful in solving problems of ensuring the reliability of technical systems in the early stages of their design.

Keywords: system; design; reliability; structural reservation; model; optimization; binary variables

Introduction

Inadequate design reliability of technical systems leads to a significant increase in the share of operating costs in total expenditures for their design, fabrication and application. At the same time, the cost of operation can many times exceed the

cost of designing and manufacturing the system [1, 3, 10]. Therefore, the reliability of technical systems should be ensured, first of all, at the design stage [2, 12, 13].

One of the main methods for ensuring the reliability of the technical systems being designed is the method of structural redundancy [6-8], which in-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

volves the use of redundant elements in the system. The essence of structural redundancy lies in the fact that in addition to the main (reserved) object containing the minimum required number of elements for the normal performance of the system's functions, in the system structure the additional identical (in terms of performed operational functions and reliability) elements are introduced. These redundant elements are designed to perform the work functions of the main elements. Thus, a system with redundancy is a system containing redundant structural components with respect to being reserved object that perform the same work functions as the corresponding components of the main object. The redundant system remains operable after subsequent failure of any element if the number of operable elements does not become less than the minimum required number provided for by regulatory requirements for the main object.

The problem of rational choice of one of the several variants of the system composition always arises during the structural redundancy. On the one hand, to increase reliability it is desirable to provide each of the system elements with maximum possible number of redundant elements, and, on the other hand, it is impossible to design a system with too large cost, weight or dimensions. Therefore, the actual task is how to reserve the system in such a way as to provide the required level of system reliability at acceptable costs. The choice of the cost characteristic is determined by the type of the system and its purpose. For example, for aircrafts the essential factor is weight, and for the ground system – the cost. Regardless of the physical essence, the selected cost characteristic for brevity below will be referred to as cost. Usually, the problems of optimal structural redundancy of technical systems are formulated as non-linear programming problems, and to solve them, depending on the complexity and required accuracy, the special algorithms are used. They are based primarily on the dynamic programming method [6]. In this article, the initial optimization model is represented in terms of the problem of non-linear integer programming with binary variables, which greatly simplifies its numerical implementation.

Purpose

The purpose of the article is to give the designers of highly reliable technical systems that do not

know modern optimization methods and programming skills, a simple mathematical tool for choosing the optimal structure of a redundant system.

Methodology

During problem definition of the optimal structural redundancy, the main object is considered as a system consisting of n of various elements that have a coherent connection [4] (see Fig. 1).

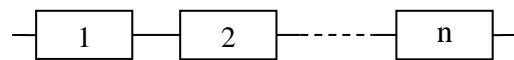


Fig. 1. Structural diagram of reliability of the main object

As the main indicator of reliability of the redundant system, the probability of its fail-safe operation is assumed. It is believed that the failure flow of elements put into operation is described by the Poisson arrival [5]. Possible variants of the main object redundancy are limited to the consideration of typical schemes of separate «cold» backup with an integer multiplicity with an ideal switch (see Fig. 2) and «hot» backup with parallel connection of elements (see Fig.3) [7].

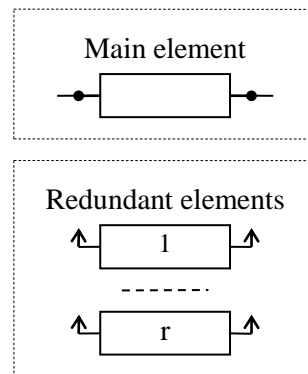


Fig. 2. Structural scheme of reliability at «cold» backup

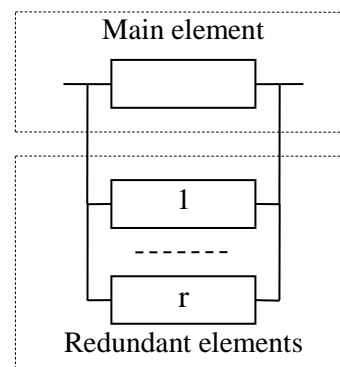


Fig. 3. Structural scheme of reliability at «hot» backup

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Note that, taking into account the assumptions made, the probability of failure-free operation of the redundant group of elements, the scheme of structural reliability of which is shown in Fig. 2, is determined by the Erlangian formula [5, 9]

$$P(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^r \frac{(\lambda t)^i}{i!}, \quad (1)$$

and the formula for calculating the probability of failure-free operation of a redundant group of elements, the structural scheme of reliability of which is shown in Fig. 3, has the form

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{r+1}, \quad (2)$$

where λ – is the failure rate of the element put into operation; r – is the redundancy rate.

Let us introduce the following designations: λ_k – is the failure rate of the element of the k -th type put into operation; m – is the maximum allowable redundancy rate of main elements; c_k – is the cost of one element of the k -th type; x_{ki} – is the binary variable, equal to 1, if the number of redundant elements of the k -th is equal to i , and $x_{ki} = 0$, if the number of redundant elements of the k -th type is not equal to i ; $p_k(t)$ – is the probability of failure-free operation of the main element of the k -th type, over the time t

$$p_k(t) = e^{-\lambda_k t}.$$

Let us consider a redundant group of elements, consisting of the elements of the k -th type. Taking into account the introduced designations, the probability of failure-free operation of a redundant group at «cold» backup is estimated by formula

$$P_k(t) = e^{-\lambda_k t} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^i x_{ki} \frac{(\lambda_k t)^j}{j!}, \quad (3)$$

and when using the «hot» backup scheme, this probability is represented as follows

$$P_k(t) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^i x_{ki} [1 - (1 - e^{-\lambda_k t})^{r+1}]. \quad (4)$$

With neglect of the cost of switching equipment in case of «cold» backup, the cost of the redundant group consisting of the elements of the k -th type in both backup schemes can be found using formula

$$C_k = \sum_{i=0}^m (i \cdot c_k \cdot x_{ki}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Taking into account the coherent connection of the main elements and the product rule, the probability of failure-free operation and the cost of the entire redundant system are determined as follows:

$$P_s(X, t) = \prod_{k=1}^n P_k(t); \quad (6)$$

$$C_s(X) = \sum_{k=1}^n C_k, \quad (7)$$

where X – is the matrix describing composition of the elements of the redundant system

$$X = \begin{pmatrix} x_{10} & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ x_{20} & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix},$$

and the probabilities $P_k(t)$ are determined using formulas (3) and (4) depending on the backup scheme used.

In terms of the mathematical programming problem, the following two typical statements of the task of optimal structural redundancy are possible.

The problem 1: it is required to find the composition of redundant elements (matrix elements X) that provides the required level of system reliability for a given time at the lowest possible cost

$$C_s(X) \rightarrow \min$$

$$P_s(X, t) \geq P^*, \quad t \in [0, T]; \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^m x_{ki} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

The problem 2: it is required to find the composition of redundant elements, which provides the highest possible level of system reliability for a given time T , with a restriction on its cost

$$P_s(X, t) \rightarrow \max$$

$$C_s(X) \leq C^*; \quad t \in [0, T]; \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^m x_{ki} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

The optimization models (8) and (9) have dimensions $n \times m$ and belong to the class of prob-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

lems of integer nonlinear programming with binary variables. The model (8) was numerically realized for cases of «cold» and «hot» separate backup using the MS Excel Solver add-in. The problem was solved with the following initial data: $n = 7$; $m = 10$; $P^* = 0,999$; $T = 10000$ h. The failure rates and cost of elements were taken using Table 1.

Table 1

Initial data		
Number of element	Failure rate (hour ⁻¹)	Cost (thous. UAH)
1	$0.02 \cdot 10^{-4}$	25
2	$0.014 \cdot 10^{-4}$	52
3	$0.09 \cdot 10^{-4}$	12
4	$0.30 \cdot 10^{-4}$	17
5	$0.11 \cdot 10^{-4}$	29
6	$0.01 \cdot 10^{-4}$	43
7	$0.07 \cdot 10^{-4}$	34

The optimal values of the unknowns x_{ki} in cases of «cold» and «hot» backup are found in Tables, respectively, 2 and 3, and the corresponding structural diagrams of the system reliability are shown in Figures 4 and 5. The calculated reliability estimates and the cost of the optimal system for «cold» and «hot» backup are listed in Table 4.

Table 2

Optimal parameters of the «cold» backup				
k\i	0	1	2	3
1	0	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	0
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0

Table 3

Optimal parameters of the «hot» backup							
k\i	0	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	0

Table 4

The reliability parameters and the cost of optimal system									
Backup type	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P _s	C _s
cold	0.99982	0.99995	0.99982	0.99983	0.99981	0.99992	0.99993	0.99908	533
hot	0.99999	0.99999	0.99994	0.99992	0.99988	0.99999	0.99997	0.99971	718

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

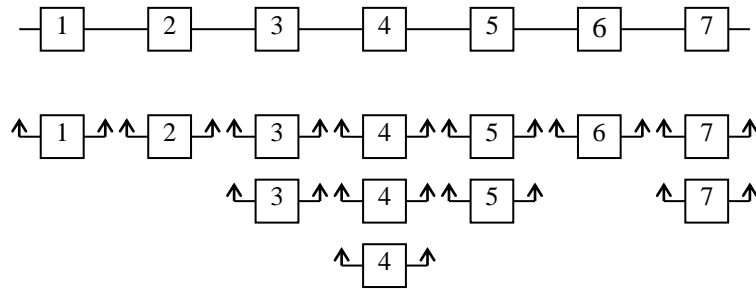


Fig. 4. Optimal structural scheme of the system reliability with «cold» redundancy

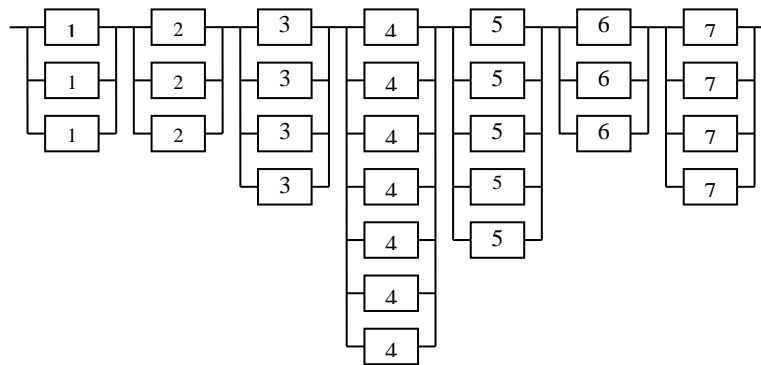


Fig. 5. Optimal structural scheme of the system reliability with «hot» redundancy

Findings

The calculated models for estimating reliability, as well as the optimization models for the redundant systems according to the «hot» and «cold» separate backup schemes, have been developed. The optimal options for reserving the 7 element object at separate «cold» and «hot» backup using the Excel spreadsheet were found.

Originality and practical value

New calculation models for estimating the reliability of redundant systems are proposed, as well as the optimization models developed on their basis, which are formulated using the unknown decomposition of initial problem of structural redundancy into binary components. The obtained optimization models belong to the class of problems of non-linear mathematical programming with binary variables, for the numerical solution of which (even for a sufficiently large dimensions) the well-known packages of applied computer programs, in particular, the MS Excel spreadsheet, are well adapted. Thus, the process of solving the initially very complicated problem of optimal structural redundancy is greatly simplified

and reduced to performing elementary actions in the corresponding programming interfaces. The proposed calculation models for estimating the reliability of redundant systems, the models of optimal structural redundancy, and the methodology for their formation in order to simplify further numerical implementation can be useful in solving the problems of ensuring the reliability of technical systems at the early stages of their design.

Conclusions

The results obtained in the article using the specific examples show the efficiency and sufficient generality of the considered approach to solving the problems of optimal structural redundancy. The optimization models (8) and (9) belong to the class of non-linear programming problems with binary variables and are easily implemented numerically in the operating environment of the Excel spreadsheet. The obtained calculation models for estimating the reliability of redundant systems (3) – (6), the models for optimal structural redundancy (8) and (9), and the methodology for their formation can be used in practical problems of ensuring the reliability of technical systems at the early stages of their design.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Афанасьев, В. П. Надежность тонкостенной оболочки в условиях коррозионного износа / В. П. Афанасьев, Г. И. Семенец // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 11. – С. 171–174.
2. Безопасность и надежность сложных систем : учеб. пособие / Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов [и др.]. – Москва : Логос, 2017. – 376 с.
3. Бородин, А. В. Технично-економічне обґрунтування варіанта резервування мережної компоненти отказоустойчивой масштабируемой вычислительной системы специального назначения / А. В. Бородин // Кибернетика и программирование. – 2015. – № 6. – С. 55–70.
4. Капур, К. Надежность и проектирование систем : [пер. с англ.] / К. Капур, Л. Ламберсон. – Москва : Мир, 1980. – 604 с.
5. Каштанов, В. А. Теория надежности сложных систем / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – Москва : Физматлит, 2010. – 606 с.
6. Насонова, С. С. Оптимизация риска отказа в задачах управления надежностью стальных резервуаров для нефтепродуктов / С. С. Насонова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 20. – С. 126–130.
7. Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов, О. Л. Шестопалова. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 352 с.
8. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – Санкт-Петербург : БХВ, 2006. – 704 с.
9. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – Санкт-Петербург : Политехника, 2000. – 248 с.
10. Трошин, А. В. Оптимизация резервирования в коммутируемых пакетных сетях / А. В. Трошин // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 4. – С. 354–360.
11. Шишмарев, В. Ю. Надёжность технических систем : учебник / В. Ю. Шишмарев. – Москва : Юрайт, 2018. – 306 с.
12. Chanda, N. Redundant Transmitting System in Aircraft (RTSA) / N. Chanda // SAE Technical Paper Series 2015-01-2443. – 2015. doi: 10.4271/2015-01-2443
13. Jaberipur, G. Redundant Number System-Based Arithmetic Circuits / G. Jaberipur // Arithmetic Circuits for DSP Applications. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. – P. 273–312. doi: 10.1002/9781119206804.ch8

С. М. СЕМЕНЕЦ^{1*}, С. С. НАСОНОВА^{2*}, Г. І. СЕМЕНЕЦЬ^{3*}

^{1*}Каф. «Прикладна математика та інформаційні технології», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (067) 639 60 64, ел. пошта Ssemenets28@gmail.com, ORCID 0000-0002-6359-1069

^{2*}Каф. «Вища математика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (097) 940 98 56, ел. пошта ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID 0000-0002-0920-7417

^{3*}Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 879 48 19, ел. пошта semga1952@gmail.com, ORCID 0000-0003-2693-3282

ОПТИМАЛЬНЕ СТРУКТУРНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Мета. Основна мета статті – дати проектувальникам високонадійних технічних систем, які не володіють спеціальними знаннями в галузі оптимізації та навичками програмування, простий і доступний математичний інструмент для вибору оптимального рішення під час структурного резервування систем. **Методика.** За головний показник надійності резервованої системи прийнята ймовірність її безвідмовної роботи. Розглянуті дві типові схеми резервування: 1) схема роздільного «гарячого» резервування; 2) схема роздільного «холодного» резервування. Сформульовані розрахункові моделі оцінки надійності резервованих систем. **Результати.** У роботі запропоновані оптимізаційні моделі, що дозволяють знайти раціональний варіант резервування проектованої системи з урахуванням суперечливих вимог до її надійності й вартості. Ці моделі чисельно реалізуються в операційному середовищі табличного процесора Excel стосовно основного об'єкта, який складається із 7 елементів. Наведені оптимальні варіанти резервування цього об'єкта за схемами «га-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

рячого» й «холодного» роздільного резервування. **Наукова новизна.** Запропоновані нові розрахункові моделі оцінки надійності резервованих систем, а також розроблені на їх основі оптимізаційні моделі, які сформульовані з використанням розкладання невідомих вихідної задачі структурного резервування на бінарні складові. При цьому отримані оптимізаційні моделі відносяться до класу задач нелінійного математичного програмування з двійковими змінними, для чисельного вирішення яких (навіть за досить великої розмірності) добре пристосовані широко відомі пакети прикладних комп'ютерних програм, зокрема табличний процесор MS Excel. Таким чином, процес вирішення спочатку досить складної задачі оптимального структурного резервування значно спрощується і зводиться до виконання елементарних дій у відповідних програмних інтерфейсах. **Практична значимість.** Запропоновані розрахункові моделі оцінки надійності резервованих систем, моделі оптимального структурного резервування, а також методологія їх формування з метою спрощення подальшої чисельної реалізації можуть бути корисні при вирішенні задач забезпечення надійності технічних систем на ранніх стадіях їх проектування.

Ключові слова: система; проектування; надійність; структурне резервування; модель; оптимізація; бінарні змінні

С. Н. СЕМЕНЕЦ^{1*}, С. С. НАСОНОВА^{2*}, Г. И. СЕМЕНЕЦ^{3*}

^{1*}Каф. «Прикладная математика и информационные технологии», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (067) 639 60 64, эл. почта Ssemenets28@gmail.com, ORCID 0000-0002-6359-1069

^{2*}Каф. «Высшая математика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (097) 940 98 56, эл. почта ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID 0000-0002-7228-7499

^{3*}Каф. «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (096) 879 48 19, эл. почта semga1952@gmail.com, ORCID 0000-0003-2693-3282

ОПТИМАЛЬНОЕ СТРУКТУРНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель. Основная цель статьи – дать проектировщикам высоконадежных технических систем, не обладающим специальными знаниями в области оптимизации и навыками программирования, простой и доступный математический инструмент для выбора оптимального решения при структурном резервировании систем. **Методика.** В качестве главного показателя надежности резервированной системы принята вероятность ее безотказной работы. Рассмотрены две типовые схемы резервирования: 1) схема раздельного «горячего» резервирования; 2) схема раздельного «холодного» резервирования. Сформулированы расчетные модели оценки надежности резервированных систем. **Результаты.** В работе предложены оптимизационные модели, позволяющие найти рациональный вариант резервирования проектируемой системы с учетом противоречивых требований к ее надежности и стоимости. Данные модели численно реализуются в операционной среде табличного процессора Excel применительно к основному объекту, состоящему из 7 элементов. Приведены оптимальные варианты резервирования этого объекта по схемам «горячего» и «холодного» раздельного резервирования. **Научная новизна.** Предложены новые расчетные модели оценки надежности резервированных систем, а также разработанные на их основе оптимизационные модели, которые сформулированы с использованием разложения неизвестных исходной задачи структурного резервирования на бинарные составляющие. При этом полученные оптимизационные модели относятся к классу задач нелинейного математического программирования с двоичными переменными, для численного решения которых (даже при достаточно большой размерности) хорошо приспособлены широко известные пакеты прикладных компьютерных программ, в частности табличный процессор MS Excel. Таким образом, процесс решения изначально весьма сложной задачи оптимального структурного резервирования значительно упрощается и сводится к выполнению элементарных действий в соответствующих программных интерфейсах. **Практическая значимость.** Предложенные расчетные модели оценки надежности резервированных систем, модели оптимального структурного резервирования, а также методология их формирования с целью упрощения дальнейшей численной реализации могут быть полезны при решении задач обеспечения надежности технических систем на ранних стадиях их проектирования.

Ключевые слова: система; проектирование; надежность; структурное резервирование; модель; оптимизация; бинарные переменные

REFERENCES

1. Afanasev, V. P., & Semenets, G. I. (2006). Reliability of a thin-walled shell under conditions of corrosive wear. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 11, 171-174. (in Russian)
2. Aleksandrovskaya, L. N., Aronov, I. Z., & Kruglov, V. I. (2017). *Bezopasnost i nadezhnost slozhnykh sistem: uchebnoe posobie*. Moscow: Logos. (in Russian)
3. Borodin, A. V. (2015). Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie varianta rezervirovaniya setevoy komponenty ot-kazoustoychivoy masshtabiruемой vychislitelnoy sistemy spetsialnogo naznacheniya. *Kibernetika i programmirovanie*, 6(6), 55-70. doi: 10.7256/2306-4196.2015.6.17523 (in Russian)
4. Kapur, K., & Lamberson, L. (1980). *Reliability in engineering design*. Moscow: Peace. (in Russian)
5. Kashtanov, V. A., & Medvedev, A. I. (2010). *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
6. Nasonova, S. S. (2008). The optimization of failure risk in management tasks reliability of steel storage tanks for petroleum products. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 20, 126-130. (in Russian)
7. Dorokhov, A. N., Kernozhitskiy, V. A., Mironov, A. N., & Shestopalova, O. L. (2011). *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem*. Saint Petersburg: Lan. (in Russian)
8. Polovko, A. M., & Gurov, S.V. (2006). *Fundamentals of the theory of reliability*. Saint Petersburg: BHV. (in Russian)
9. Ryabinin, I. A. (2000). *Reliability and safety of structurally complicated systems*. Saint Petersburg: Politekhnik. (in Russian)
10. Troshin, A. V. (2017). Optimizatsiya rezervirovaniya v kommutiruemykh paketnykh setyakh. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 15(4), 354-360. (in Russian)
11. Shishmarev, V. Y. (2018). *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem: uchebnik dlya bakalavriata i magistratury*. Moscow: Yurayt. (in Russian)
12. Chanda, N. (2015). Redundant Transmitting System in Aircraft (RTSA). *SAE Technical Paper Series*, 2015-01-2443. doi: 10.4271/2015-01-2443 (in English)
13. Jaberipur, G. (2017). Redundant Number System-Based Arithmetic Circuits. In *Arithmetic Circuits for DSP Applications* (pp. 273-312). Hoboken: John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781119206804.ch8 (in English)

Received: April 30, 2018

Accepted: August 02, 2018

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.365.22

А. О. ВЛАСОВ^{1*}, С. В. ЗДАНЕВИЧ^{2*}

^{1*}Каф. «Металургійне обладнання», Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (061) 227 12 42, ел. пошта vlasovzgia@ukr.net, ORCID 0000-0003-3253-6435

^{2*}Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 452 79 52, ел. пошта sergzd@i.ua, ORCID 0000-0001-8594-3806

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОДОТРИМАЧА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВІБРАЦІЇ ЕЛЕКТРОДА

Мета. У науковій роботі необхідно: 1) розробити математичну модель і визначити динамічні параметри механічної системи балансирного електродотримача (БЕ) дугової сталеплавильної печі; 2) виконати порівняльну оцінку максимальних амплітуд і характеру змушених та вільних згасальних коливань електрода в горизонтальній площині після скидання електродинамічного навантаження для балансирного електродотримача й електродотримача з жорстким кріпленням рукава до стійки; 3) визначити характеристики демпфера сухого тертя на основі ортогонального клинового механізму з початковим натягом лінійних пружних елементів за умови урахування можливих амплітуд і частот коливань електродотримача. **Методика.** Поставлене завдання вирішувалось за допомогою методів теоретичної механіки й теорії коливань, динамічного аналізу механічної системи електродотримачів (СЕ) з урахуванням нестационарного електродинамічного збудження. Моделювання механічних коливань електрода в горизонтальній площині здійснювалось засобами MathCAD. **Результати.** Розглянуто динамічну систему балансирного електродотримача на основі подвійного фізичного маятника з пружно-дисипативними зв'язками. Визначено параметри динамічної моделі та електродинамічного збудження коливань. Складено диференціальні рівняння змушених коливань дисипативної системи з двома ступенями волі. Виконано математичне моделювання змушених і вільних коливань електрода в горизонтальній площині. Доведено можливість зменшення амплітуд коливань електродів у системі балансирного електродотримача під час дії електродинамічного збудження та скидання навантаження. **Наукова новизна.** Уперше виконаний динамічний синтез системи балансирних електродотримачів дугової сталеплавильної печі з урахуванням зміни динамічних параметрів механічної системи електродотримачів і можливих електродинамічних впливів на струмовідні елементи несної конструкції та електрод. Динамічний синтез та аналіз таких конструкцій електродотримачів раніше не виконувався. **Практична значимість.** Розроблені практичні рекомендації й аналітичні залежності щодо вибору динамічних параметрів механічної системи балансирного електродотримача за умови мінімального відхилення електрода від початкового положення в горизонтальній площині. Запропонована конструкція демпфера сухого тертя на основі ортогонального клинового механізму з лінійними пружними елементами та їх початковим натягом.

Ключові слова: механізм переміщення електродів; балансирний електродотримач; динамічна система; електродинамічні сили; коливання; амплітуда

Вступ

Електроди є елементами складної мехатронної системи трифазних дугових сталеплавильних печей (ДСП) [18], що включає механізми переміщення електродів (МПЕ), коротку стру-

мовідну мережу електродотримачів та системи автоматичного регулювання (САР) МПЕ, які пов'язані прямими та зворотними динамічними зв'язками [14, 19].

Електродинамічна взаємодія просторової системи струмопідводів і електродів ДСП збу-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

джує згинальні та крутильні коливання в системі «електрод – електродотримач – стійка», які призводять до просторового переміщення електродів. Це впливає на струм дуги, електричні параметри короткої мережі ДСП, знижує середню активну потужність печі, порушує роботу САР [7].

Для особливо потужних ДСП застосовують дві основні конструкції електродотримачів зі струмовідними несними рукавами або трубошинами [1, 18]. Усі вони мають високий рівень вібрацій електродів у початковий період плавлення і для підтримки нормального режиму плавлення й уникнення автоколивальних і резонансних явищ потребують застосування САР МПЕ [9, 17]. Максимальні амплітуди коливань у трифазній ДСП виявлені в електродотримача зовнішньої фази в горизонтальній площині [15, 16].

Складений із секцій графітований електрод під час плавлення піддається комплексному механічному, електродинамічному, термічному навантаженню, що впливає на складний напружений стан і міцність матеріалу електрода і його конструктивних елементів [11]. Найбільшу небезпеку для міцності електрода й ніпельних з'єднань його секцій становлять вібраційні навантаження, які мають знакозмінний характер, що знижує характеристики міцності матеріалу, призводить до розслаблення затягування ніпельних з'єднань секцій електродів, утворення тріщин та може бути причиною руйнування електродів.

Одним із факторів руйнування електродів є вібраційне навантаження з амплітудами, які перевищують граничні значення за умовою міцності матеріалу. Тому актуальними слід вважати дослідження, що спрямовані на подальше вдосконалення механічної системи електродотримачів за допомогою використання нових конструктивних рішень із системами віброзахисту, раціональним вибором динамічних параметрів і застосування пристроїв для демпфування коливань металоконструкції, що тримає електрод.

Мета

У науковій роботі необхідно: 1) розробити математичну модель і визначити динамічні параметри механічної системи балансного електродотримача дугової сталеплавильної печі; 2) виконати порівняльну оцінку максимальних амплітуд і характеру змушених і вільних зга-

сальних коливань електрода в горизонтальній площині після скидання електродинамічного навантаження для балансного електродотримача й електродотримача з жорстким кріпленням рукава до стійки; 3) визначити характеристики демпфера сухого тертя на основі ортогонального клинового механізму з початковим натягом лінійних пружних елементів за умови урахування можливих амплітуд і частот коливань електродотримача.

Методика

Розв'язання поставленого завдання здійснюється на основі декомпозиції складної просторової коливальної системи БЕ трифазної ДСП і розробки наведеної до горизонтальної площини динамічної моделі електродотримача на підставі прийнятих допущень і відомих положень та методів теоретичної механіки й теорії коливань. Імітаційне моделювання коливань електрода в перехідних режимах здійснювалось за допомогою засобів MathCAD.

Результати

Об'єктом дослідження впливу конструктивної схеми, геометричних і динамічних параметрів системи електродотримача (СЕ) ДСП на коливання електродів у горизонтальній площині є триангульована система електродотримачів трифазних ДСП-50Н2 (рис. 1, *a, б*) з гідравлічними МПЕ (рис. 1, *в*) [12, 19]. Для зменшення амплітуд коливань електродів у горизонтальній площині запропонована схема із шарнірним кріпленням рукава електродотримача до стійки [10].

Для порівняльного дослідження взяті дві розрахункові схеми (рис. 2): вихідна з жорстким кріпленням рукава електродотримача до стійки (рис. 2, *a*) і БЕ із шарнірним кріпленням рукава до стійки і пружними демпферними вузлами (рис. 2, *б*), де відповідно:

- m_{st} , I_{stz} , c_1 – маса, момент інерції щодо вертикальної осі z й крутильна жорсткість стійки;
- m_p , I_{pz} – маса й момент інерції рукава щодо осі z ;
- L_e , d_e , m_e , I_{ez} – довжина, діаметр, маса й момент інерції електрода щодо осі z ;
- c_{gk} , λ_{gk} – жорсткість пружних елементів і коефіцієнт поглинання гасника коливань;

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

– L_1, L_2 – координати розташування шарніра рукава й гасника коливань щодо осі стійки;
– L_{p1}, L_{p2} – геометричні розміри ділянок рукава.

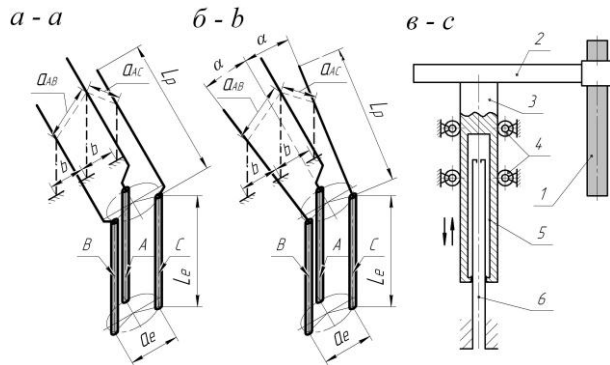


Рис. 1. Триангульована СЕ ДСП-50Н2 з паралельним (а) і непаралельним (б) розташуванням трифазного струмопідводу, МПЕ з гідравлічним приводом (в): 1 – електрод; 2 – рукав електродотримача; 3 – рухлива стійка; 4 – напрямні ролики; 5 – гідроциліндр; 6 – шток

Fig. 1. Triangulated electrode holder system EAF-50N2 with parallel (a) and non-parallel (b) location of the current leads, electrode-positioning mechanism with hydraulic drive (c): 1 – electrode; 2 – sleeve; 3 – mobile rack; 4 – guiding rollers; 5 – hydraulic cylinder; 6 – stock

Для дослідження малих коливань електрода в горизонтальній площині приведена двомасова динамічна система БЕ (рис. 3, а).

Стойка 1 умовно шарнірно закріплена (т. O_1). Крутильна жорсткість стійки c_1 електродотримача приведена до шарніра (т. В) на підставі рівності потенційних енергій:

$$c_{st} = c_1 / L_2^2. \quad (1)$$

Рукав електродотримача 2 шарнірно закріплений на стійці (т. В) і спирається (т. А) на пружні елементи гасника коливань. Пружні елементи гасника коливань у вихідному стані не деформовані. Паралельно до пружних елементів установлені демпфери, що створюють в'язкий опір. Опір від сил тертя в шарнірі (т. В) не враховуємо.

Позитивні напрямки узагальнених кутових координат (φ_1 – стійки; φ_2 – рукав електродотримача) взяті від положення рівноваги ($\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 0$) за годинниковою стрілкою (рис. 3, б).

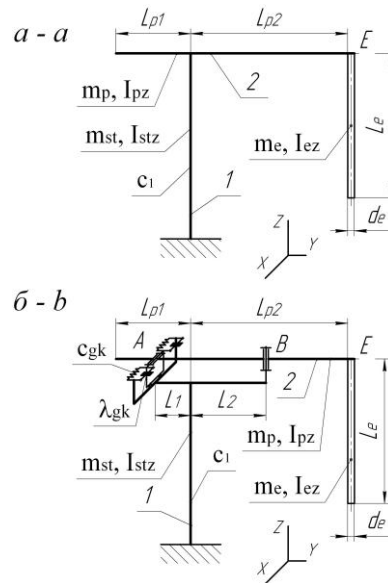


Рис. 2. Розрахункова схема системи «стійка – електродотримач – електрод»: а – із жорстким кріпленням електродотримача до стійки; б – балансного електродотримача із шарнірним кріпленням рукава до стійки і пружними демпферними вузлами (1 – стійка; 2 – рукав із електродом)

Fig. 2. Calculation scheme of the system «column – electrode holder – electrode»: а – with a rigid mounting of the electrode holder to the rack; б – balanced electrode holder with a hinged mount to the rack and elastic-damping nodes (1 – rack; 2 – sleeve with an electrode)

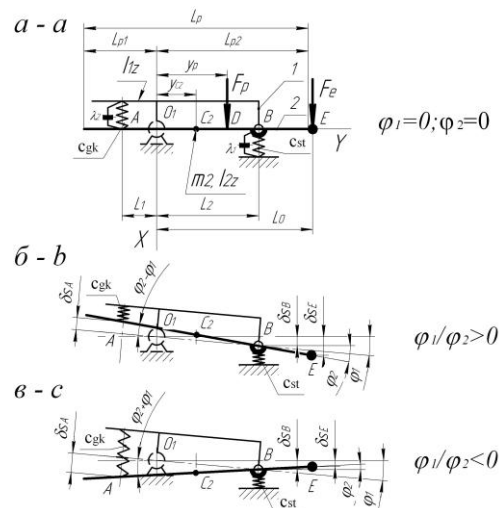


Рис. 3. Приведена двомасова динамічна модель БЕ: а – вихідне положення; б – перша форма коливань; в – друга форма коливань

Fig. 3. A two-mass dynamic model of balanced electrode holder is presented: а – initial position; б – the first form of oscillations; в – the second form of oscillations

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

На підставі рівнянь Лагранжа другого роду диференціальні рівняння малих змушених коливань у дисипативній системі з двома ступенями волі мають вигляд [4]:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{12} \cdot \ddot{\varphi}_2 + b_{11} \dot{\varphi}_1 + \\ + b_{12} \dot{\varphi}_2 + c_{11} \cdot \varphi_1 + c_{12} \cdot \varphi_2 = Q_1 \\ a_{21} \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{22} \cdot \ddot{\varphi}_2 + b_{21} \dot{\varphi}_1 + \\ + b_{22} \dot{\varphi}_2 + c_{21} \cdot \varphi_1 + c_{22} \cdot \varphi_2 = Q_2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де a_{js} , b_{js} , c_{js} – відповідно інерційні, дисипативні та квазіпружні коефіцієнти; Q_s – узагальнена сила; $j = \overline{1,2}$; $s = \overline{1,2}$.

На підставі кінетичної й потенційної енергії, а також дисипативної функції коливальної системи, інерційні, квазіпружні й дисипативні коефіцієнти в рівняннях (2) матимуть вигляд:

$$a_{11} = I_{1z} + m_2 L_2^2; \quad a_{12} = a_{21} = m_2 L_2 b; \\ a_{22} = I_{2c_2} + m_2 b^2, \quad \text{тут } m_2 = m_p + m_e; \quad (3)$$

$$c_{11} = c_{st} L_2^2 + c_{gk} (L_1 + L_2)^2; \\ c_{12} = c_{21} = -c_{gk} (L_1 + L_2)^2; \quad c_{22} = -c_{12}; \quad (4)$$

$$b_{11} = \lambda_1 L_2^2 + \lambda_2 (L_1 + L_2)^2; \\ b_{12} = b_{21} = -\lambda_2 (L_1 + L_2)^2; \quad b_{22} = -b_{12}, \quad (5)$$

де λ_1 і λ_2 – коефіцієнти непружного опору.

Узагальнені сили Q_1 і Q_2 , що відповідають сумарному електродинамічному впливу на рукав і електрод від рівнодійних сил F_p і F_e складають:

$$Q_1 = (F_p + F_e) L_2; \\ Q_2 = -F_p (L_2 - y_p) + F_e (L_0 - L_2) \quad (6)$$

Електродинамічні навантаження в системі є функцією часу й залежать від конфігурації контуру (рис. 1) і струмів взаємодійних фаз та набувають максимальних значень за ударних струмів короткого замикання (КЗ). Для оцінки впливу максимального електродинамічного збудження приймаємо, що рукави електро-

тримачів триангульованого струмопідводу ДСП розташовані в одній горизонтальній площині [5].

Максимальне зусилля на рукав електродотримача під час взаємодії зі струмами сусідніх фаз можна визначити за формулою:

$$F_{p \max} = 10^{-7} \cdot k_p \cdot I^2, \quad (7)$$

де k_p – геометричний коефіцієнт контуру струмів взаємодіючих фаз; I – ударний струм КЗ.

Рівнодійна сила від рівномірно розподіленого електродинамічного навантаження під час взаємодії в трифазній системі електродів, що розташовані по кутах рівностороннього трикутника зі стороною a_e , приведена до вертикальної площини, яка перпендикулярна осі рукава електродотримача, і набуває максимальних значень за струмів КЗ згідно з формулою:

$$F_{e \max} = 10^{-7} \cdot k_{KZ} \cdot k_{pr.e} \cdot \frac{L_e}{a_e} \cdot I^2, \quad (8)$$

де k_{KZ} – коефіцієнт, що залежить від виду КЗ; $k_{pr.e}$ – коефіцієнт наведення нормальної площини до осі рукава; a_e – відстань між електродами; L_e – робоча довжина електрода.

Під час моделювання змушених коливань електродотримача зовнішньої фази в горизонтальній площині враховувався гармонійний характер зміни в часі складових електродинамічного навантаження з подвійною частотою змінного струму в трифазній мережі.

Для конструкції електродотримача з жорстким кріпленням рукава до стійки (рис. 2, а) диференціальне рівняння змушених крутильних коливань дисипативної системи з одним ступенем волі матиме вигляд:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = Q/I_{i\delta}, \quad (9)$$

тут узагальнена сила $Q = F_e L_0 + F_p y_p$; власна частота вільних коливань $k = \sqrt{c_1/I_{np}}$; коефіцієнт загасання $n = 0,5 \lambda_1/I_{np}$, де наведений до осі стійки електродотримача момент інерції системи $I_{np} = I_{1z} + I_{2z}$.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Крутильну жорсткість стійки електродотримача з урахуванням наведеної жорсткості c_{rol} вузла верхніх опорних роликів (рис. 4) визначаємо за формулою:

$$c_1 = c_a(c_b + c_{rol}) / (c_a + c_b + c_{rol}), \quad (10)$$

тут крутильні жорсткості ділянок стійки (рис. 4, а): над верхніми опорними роликами $c_a(L_e) = GJ_{st} / (L_{st0} + L_e - L_{e\min})$, між верхніми і нижніми опорними роликами $c_b = GJ_{st} / L_{rol}$, де G – модуль пружності другого роду; J_{st} – полярний момент інерції перерізу стійки; L_{st0} – мінімальна довжина вертикальної ділянки стійки; $L_{e\min}$ – мінімальна довжина робочої частини електрода; L_{rol} – довжина ділянки стійки між верхніми і нижніми опорними роликами.

Стійка електродотримача щодо вісі z може мати симетричну лінійну (рис. 4, б) або кусково-лінійну крутильну пружну характеристику (рис. 4, в) залежно від пружної характеристики вузла верхніх опорних роликів.

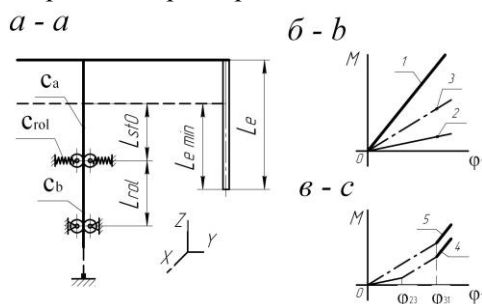


Рис. 4. Стійка електродотримача (а) з опорними роликами, лінійна (б) і кусково-лінійна (в) пружна характеристика системи «стійка – опорні ролики» у функції куткової координати за умовного заземлення:

- 1 – у верхніх опорних роликах; 2 – у нижніх опорних роликах; 3 – з урахуванням лінійної жорсткості вузла верхніх опорних роликів; 4 – із зазором (φ_{23}) і 5 – з твердим упором (φ_{31}) у вузлі опорних роликів

Fig. 4. Rack of the electrode holder (a) with support rollers, linear (b) and piecewise linear (c) elastic characteristic of the system of «rack-support rollers» in the function of angular coordinate during conditional locking:

- 1 – in the upper supporting rollers; 2 – in the lower supporting rollers; 3 – taking into account the linear stiffness in the nodes of the upper support rollers; 4 – with the gap (φ_{23}) and 5 – with a solid stop (φ_{31}) in the node of the support rollers

Результати досліджень [8] показали, що основну роль в амплітуді пружних коливань електрода відіграє фактор нежорсткого закріплення стійки електродотримача в напрямних роликах, при цьому для підвищення стійкості динамічної системи необхідно збільшити розсіювання енергії коливань у роликівих опорах і стійці.

У роботі [5] наведено розрахунки максимальних значень зосередженого електродинамічного навантаження на електрод (у діапазоні зміни його робочої довжини) і рукав крайнього електродотримача за різних варіантів режиму КЗ для максимального струму КЗ (73 кА), який зареєстрований під час експериментальних досліджень СЕ ДСП-50Н2 в режимі запалювання дуги (рис. 5, а). Логарифмічний декремент коливань електродотримача в горизонтальній площині за даними експерименту склав 0,36...0,74.

Особливо небезпечні коливання електродів виникають під час замикання електричної дуги на стінку колодязя (рис. 5, б), що утворюється в разі плавлення шихти. Унаслідок електродинамічної взаємодії струмопідводів сусідніх фаз за ударного струму КЗ, електрод розриває дугу, а потім, коли зникає струм за рахунок пружної деформації конструкції, яка приймає електрод, знову повертається в положення, що відповідає КЗ. Таким чином, виникають стійкі електромеханічні коливання з частотою, близькою до власної частоти коливань конструкції, що приймає електрод, тобто коливання є самозбудними і мають характер биття.

За алгоритмом [5] розраховані координати розташування шарніра рукава електродотримача й жорсткості пружних елементів гасника коливань за статичної дії максимальних електродинамічних сил (з урахуванням виду КЗ) на елементи струмовідного контуру електродотримача за умови мінімального відхилення точки кріплення електрода від вихідного положення.

Для крайнього БЕ ДСП-50Н2 взяті для розрахунку геометричні розміри стійки, рукава й електрода: $L_{rol} = 2,7$ м, $L_1 = 0,6$ м; $L_2 = 2,85$ м; $L_{p1} = 1,65$ м; $L_{p2} = 4,045$ м; $d_e = 0,5$ м; $L_e = 2,7...5,0$ м; $\Delta L_e = 0,4$ м.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Інерційні параметри коливальної системи:
 $I_{1z} = 984 \text{ кгм}^2$; $m_p = 5450 \text{ кг}$; $I_p = 14730 \text{ кгм}^2$;
 $I_{2z} = 56469 \text{ кгм}^2$.

Для крайнього електродотримача ДСП-50Н2, відповідно до робочої довжини електрода L_e та умов закріплення стійки, крутильна жорсткість системи «стійка – опорні ролики» може змінюватися в межах 308,73...20,2 МНм (рис. 6, а), при цьому жорсткість пружних елементів гасника коливень під час розрахунків була прийнята 162 кН/м. Електродинамічні сили, що діють на СЕ, визначені за максимального струму КЗ (73 кА) між фазами А, В і С (рис. 1, а).

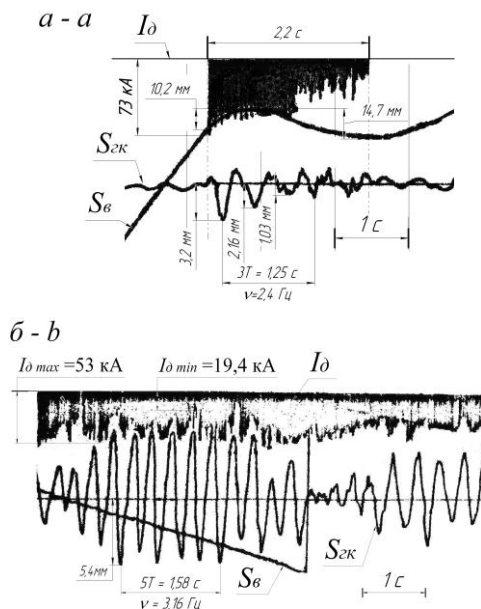


Рис. 5. Фрагмент осцилограми вертикального переміщення (S_e) електрода та його коливань (S_{ek}) у горизонтальній площині в процесі регулювання струму дуги (I_d) ДСП-50Н2:
 а – під час запалювання та розриву дуги; б – під час руху електрода нагору в проплавленому колодязі

Fig. 5. Oscilloscope fragment of the electrode vertical displacements (S_e) and its oscillations (S_{ek}) in the horizontal plane during the current regulation of the arc (I_d) of EAF-50N2:
 a – when igniting and breaking the arc; b – when moving the electrode up in a melted well

На основі системи рівнянь (2) і рівняння (9) за нульових початкових умов виконане моделювання коливань електрода (рис. 7, 8) для випадку раптового додавання електродинамічного навантаження й після його скидання в си-

стемі з жорстким і шарнірним кріпленням рукава електродотримача до стійки. Координата положення електрода x_E (рис. 2, а) під час коливань системи: для БЕ $x_E = \varphi_1 L_2 + \varphi_2 (L_0 - L_2)$, для вихідної конструкції електродотримача $x_E = \varphi L_0$.

Моделювання коливань електрода в горизонтальній площині виконувалося за розрахункових перемінних інерційних параметрів системи, які відповідають робочій довжині L_e електрода, мінімальній крутильній жорсткості стійки c_1 (рис. 6, а), при постійному значенні або заданому законі зміни коефіцієнта жорсткості c_{gk} гасника коливень. Прийняті коефіцієнти $\lambda_1 = 18 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$, $\lambda_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$.

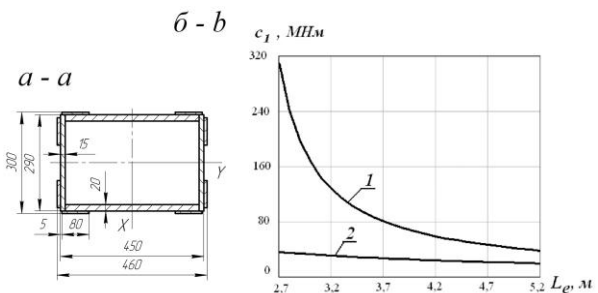


Рис. 6. Переріз (а) та крутильна жорсткість (б) стійки електродотримача ДСП-50Н2 у функції робочої довжини електрода за умовного защемлення:
 1 – у верхніх опорних роликах;
 2 – у нижніх опорних роликах

Fig. 6. The cross-section (a) and torsional stiffness (b) of the electrode holder rack for the EAF-50N2 in the function of operating length of the electrode during conditional locking:
 1 – in the upper supporting rollers;
 2 – in the lower supporting rollers

Результати моделювання змушених коливань електрода за умови електродинамічного впливу з постійною амплітудою в можливих режимах КЗ (рис. 8) з урахуванням зміни динамічних параметрів СЕ (рис. 7) і згасальних вільних коливань після скидання навантаження вказують на можливість зниження в 1,43...1,71 раза (ділянка I, рис. 7) та в 1,37...2,08 раза (ділянка II, рис. 7) максимальної амплітуди коливань електрода, порівняно з амплітудами коливань (1,3...3,6 мм) СЕ з жорстким кріпленням рукава

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

до стійки в разі визначених раціональних значень та закону зміни жорсткості й коефіцієнта опору гасника коливань.

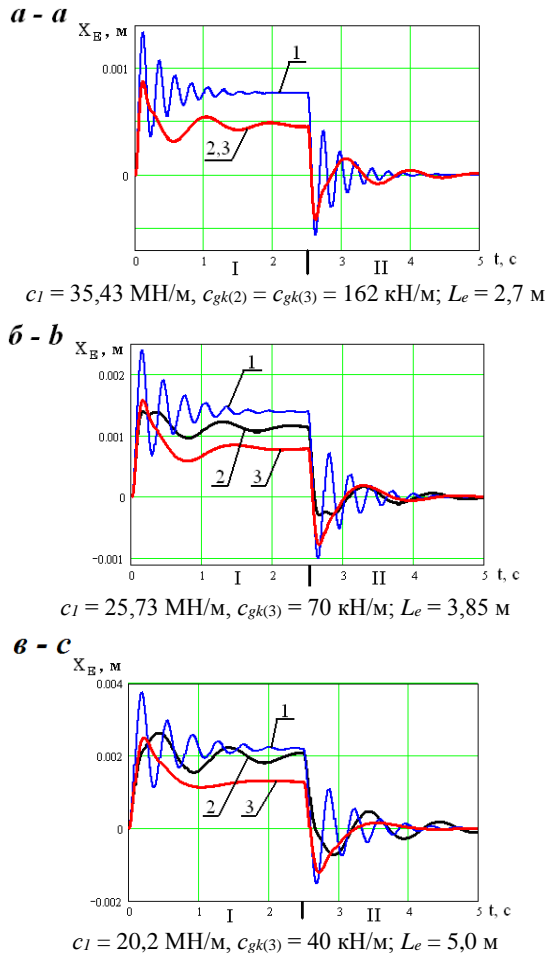


Рис. 7. Результати моделювання змушених коливань (ділянка I) електрода під час дії електродинамічного впливу в режимі КЗ між фазами ВС на систему «електродотримач – електрод» і згасальних вільних коливань (ділянка II) електрода після скидання навантаження в разі зміни параметрів жорсткості гасника коливань:

- 1 – вихідна конструкція електродотримача;
 2 – балансірний електродотримач, $c_{gk(2)} = \text{const}$;
 3 – балансірний електродотримач, $c_{gk(3)} = f(L_e)$

Fig. 7. Results of modeling of forced oscillations (section I) of the electrode under the action of electrodynamic effect in the short-circuit mode between phases BC on the system «electrode holder – electrode» and free decaying oscillations (section II) of the electrode after load drop when the rigidity parameters of the oscillator damper are changed:

- 1 – initial structure of the electrode holder;
 2 – balanced electrode holder, $c_{gk(2)} = \text{const}$;
 3 – balanced electrode holder, $c_{gk(3)} = f(L_e)$

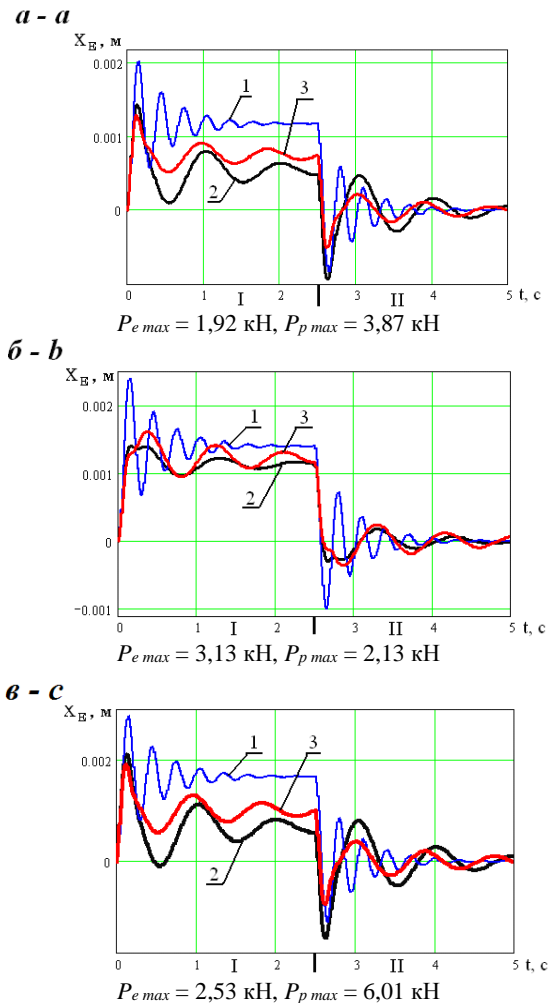


Рис. 8. Результати моделювання змушених коливань (ділянка I) електрода ($L_e = 3,85 \text{ м}$) під час дії електродинамічного впливу на систему «електродотримач – електрод» у режимах КЗ між фазами АВ, АС (а), ВС (б), АВС (в) та згасальних вільних коливань (ділянка II) електрода після скидання навантаження за різних жорсткостей гасника коливань:

- 1 – вихідна конструкція електродотримача;
 2 – балансірний електродотримач, $c_{gk(2)} = 162 \text{ кН/м}$;
 3 – балансірний електродотримач, $c_{gk(3)} = 240 \text{ кН/м}$

Fig. 8. Results of modeling of forced oscillations (section I) of the electrode ($L_e = 3,85 \text{ м}$) under the action of electrodynamic effect on the system "electrode holder – electrode" in the short-circuit mode between phases AB, AC (a), BC (b), ABC (c) and free decaying oscillations (section II) of the electrode after load drop when the rigidity parameters of the damper are different:

- 1 – initial structure of the electrode holder;
 2 – balanced electrode holder, $c_{gk(2)} = 162 \text{ кН/м}$;
 3 – balanced electrode holder, $c_{gk(3)} = 240 \text{ кН/м}$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Для гасіння коливань електрода в горизонтальній площині в підсистемі балансірного електродотримача (рис. 9, а) запропонована конструкція демпфера сухого тертя на основі ортогонального клинового механізму [6, 13] з лінійними пружними елементами та їх початковим натягом.

Для подальшого дослідження коливань підсистеми рукава балансірного електродотримача в горизонтальній площині складена приведена динамічна модель (рис. 9, б) коливальної системи.

Диференціальні рівняння руху приведеної динамічної моделі (рис. 9, б) отримано з урахуванням нелінійної сили тертя, що виникає на взаємодійних поверхнях клинів ортогонального клинового механізму демпфера сухого тертя [6]:

– для режиму прямого ходу ($\text{sgn}(\dot{x}) = 1$)

$$\begin{aligned} & (M_{np} + m_1 + m_2 \cdot i_{12}^{-2} \cdot \eta_{12}^{-1}) \cdot \ddot{x} + \\ & + F_n(x) \cdot i_{12}^{-1} \cdot \eta_{12}^{-1} = P(t) \end{aligned} \quad (11)$$

– для режиму зворотного ходу ($\text{sgn}(\dot{x}) = -1$)

$$\begin{aligned} & (M_{np} + m_1 - m_2 \cdot i_{21}^2 \cdot \mu_{21}) \cdot \ddot{x} + \\ & + F_n(x) \cdot i_{21} \cdot \mu_{21} = P(t) \end{aligned} \quad (12)$$

тут приведена до точки В динамічної моделі (рис. 9, б) маса електрода й момент інерції рукава електродотримача:

$$M_{np} = \left[m_e \cdot (L_0 - L_2)^2 + I_{pz} \right] / (L_1 + L_2)^2, \quad (13)$$

де m_1 і m_2 – маса клинів;

– кінематичні передатні відносини прямого i_{12} та зворотного i_{21} ходу:

$$i_{21} = i_{12}^{-1} = \text{tg}(\alpha); \quad (14)$$

– ККД прямого ходу:

$$\eta_{12} = \text{tg}(\alpha) / \text{tg}(\alpha + \rho); \quad (15)$$

– коефіцієнт зворотного ходу (розгальмовування):

$$\mu_{21} = \text{tg}(\rho - \alpha) / \text{tg}(\alpha), \quad (16)$$

де α – кут скосу клина; ρ – кут тертя на взаємодіючих поверхнях клинів, ($\rho < \alpha < 90^\circ - \rho$).

Силами тертя між ланками механізму і стійкою зневажаємо.

На підставі математичної моделі [13] ортогонального клинового механізму з малим тертям у напрямних сумарну нелінійну силову характеристику $F(x, \dot{x})$ (рис. 9, з) демпфера позиційного сухого тертя з початковим натягом лінійних пружних елементів, що приведена до вісі x , визначаємо за формулою:

– для режиму прямого ходу:

$$F(x, \dot{x}) = \begin{cases} c[\delta_0 + x \cdot \text{tg}(\alpha)] \cdot \text{tg}(\alpha + \rho), \\ \text{якщо } x \geq 0, \text{sgn}(\dot{x}) = 1 \\ c'[-\delta'_0 + x \cdot \text{tg}(\alpha)] \cdot \text{tg}(\alpha + \rho), \\ \text{якщо } x < 0, \text{sgn}(\dot{x}) = -1 \end{cases} \quad (17)$$

– для режиму зворотного ходу:

$$F(x, \dot{x}) = \begin{cases} c[\delta_0 + x \cdot \text{tg}(\alpha)] \cdot \text{tg}(\alpha - \rho), \\ \text{якщо } x \geq 0, \text{sgn}(\dot{x}) = -1 \\ c'[-\delta'_0 + x \cdot \text{tg}(\alpha)] \cdot \text{tg}(\alpha - \rho), \\ \text{якщо } x < 0, \text{sgn}(\dot{x}) = 1 \end{cases} \quad (18)$$

де відповідно c , c' , δ_0 , δ'_0 – жорсткості та початковий натяг лінійних пружних елементів.

Пружна складова характеристики (рис. 9, в) матиме вигляд:

$$F_n(x) = \begin{cases} F_0 + c_{np} \cdot x, \text{ якщо } x \geq 0 \\ -F'_0 + c'_{np} \cdot x, \text{ якщо } x < 0 \end{cases}; \quad (19)$$

тут зусилля початкового натягу пружних елементів $F_0 = c_{np} \cdot \delta_0$, $F'_0 = c'_{np} \cdot \delta'_0$, де $c_{np} = c \cdot \text{tg} \alpha$, $c'_{np} = c' \cdot \text{tg} \alpha$.

Для визначення симетричної пружної характеристики ($c = c'$, $\delta_0 = \delta'_0$) застосовуємо рівняння:

$$F_p(x) = F_0 \cdot \text{sgn}(x) + c_{np} \cdot x. \quad (15)$$

Коефіцієнт поглинання чи відносний гістерезис [2] демпфера становитиме:

$$\psi = W/U, \quad (20)$$

де W – енергія, що розсіюється за один період гармонічного коливання (площа, обмежена гі-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

терезисною петлею на рис. 9, з); U – повна механічна енергія за цикл навантаження.

Для симетричної пружної й дисипативної характеристики енергія становитиме:

$$W = c [tg(\alpha + \rho) - tg(\alpha - \rho)] \times \times [\delta_0 A + 0,5A^2 \cdot tg(\alpha)] \quad (21)$$

$$U = c \cdot tg(\alpha + \rho) \cdot [\delta_0 A + 0,5A^2 \cdot tg(\alpha)]. \quad (22)$$

Тоді коефіцієнт поглинання:

$$\psi = 1 - tg(\alpha - \rho) / tg(\alpha + \rho). \quad (23)$$

Коефіцієнт поглинання ψ за сили опору, що пропорційна зсуву, не залежить від амплітуди коливань, тому декремент коливань постійний, при цьому послідовні амплітуди складають геометричну прогресію [2, 3].

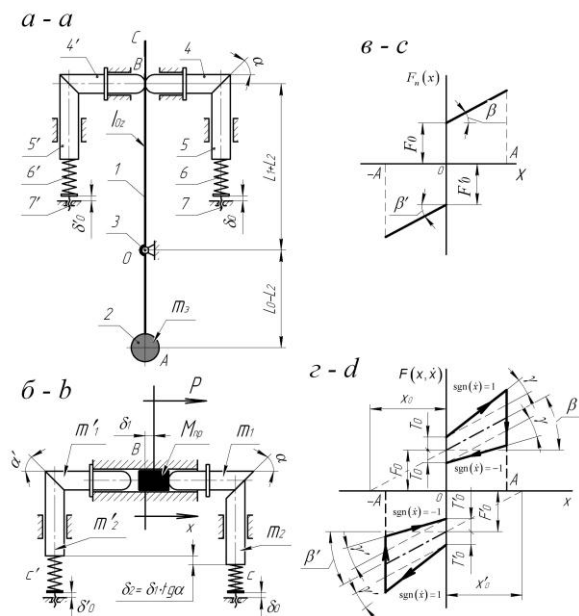


Рис. 9. Підсистема балансного електродотримача з демпфером сухого позиційного тертя й початковим натягом лінійних пружних елементів: а) кінематична схема (1 – рукав; 2 – електрод; 3 – шарнір рукава; 4, 4', 5, 5' – клини; 6, 6' – пружини; 7, 7' – натискні гвинти); б) приведена динамічна модель; в) пружна характеристика; з) петля гістерезису демпфера сухого тертя

Fig. 8. Subsystem of balanced electrode holder with a dry friction damper and an initial tension of linear elastic elements:

a) kinematic scheme (1 – sleeve hinge; 2 – sleeve; 3 – electrode; 4, 4', 5, 5' – wedges; 6, 6' – springs; 7, 7' – pressure screws); b) dynamic model; c) elastic characteristic; d) hysteresis loop of the dry friction damper

Для випадку змушених коливань у системі з сухим позиційним тертям у разі гармонійного збудження з частотою ω амплітуда коливань приблизно може бути визначена за формулою [2]:

$$A = \frac{P_0}{c_{np} \sqrt{[1 - (\omega/p)^2]^2 + (\psi/2\pi)^2}} < [A]; \quad (25)$$

тут $p^2 = c_{np}/M_{np}$, де P_0 – амплітуда приведеної електродинамічної сили, що збуджує коливання.

Амплітуда коливань електрода не повинна перевищувати допустиму амплітуду $[A]$ за критерієм міцності електрода й має бути обмежена за рахунок раціонального вибору геометричних і дисипативних параметрів демпфера.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано нову конструкцію балансирних електродотримачів із шарнірним кріпленням струмовідного рукава, що дозволяє зменшити амплітуди коливань електродів у горизонтальній площині у випадку дії нестационарного електродинамічного збудження.

Розроблено комплекс розрахункових схем і математичних моделей для дослідження динамічних властивостей механічної системи балансирного електродотримача й коливань електродів у горизонтальній площині в перехідних режимах із урахуванням можливих видів КЗ у триангульованій системі короткої мережі ДСП, зміни інерційних, пружних і дисипативних параметрів коливальної системи.

Висновки

Наявні конструкції СЕ трифазних ДСП із жорстким кріпленням рукава електродотримача до його рухливої стійки мають низьку вібраційну стійкість, що може призводити до збільшення амплітуд змушених коливань до значень, граничних для міцності графітованого електрода.

На підставі аналітичного дослідження й моделювання змушених і вільних коливань електрода в системі балансирного електродотримача ДСП-50Н2 встановлена можливість зниження

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

максимальних амплітуд в 1,43...1,71 раза, порівняно з амплітудами коливань (1,3...3,6 мм) електродотримача із жорстким кріпленням рукава до стійки й зміни характеру коливань електрода в разі дії нестационарного електродинамічного збудження за рахунок раціонального вибору динамічних параметрів системи балан-

сирного електродотримача, жорсткості й параметрів дисипації гасника коливань.

Для гасіння поперечних коливань електрода в системі балансірного електродотримача запропонована конструкція демпфера позиційного сухого тертя на основі ортогонального клинового механізму з попереднім натягом лінійних пружних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бершицкий, И. М. Электрододержатели дуговых печей / И. М. Бершицкий, В. А. Военный, А. А. Никулин // *Электрометаллургия*. – 2001. – № 5. – С. 22–28.
2. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний : учебник для вузов / В. Л. Бидерман. – Москва : Высш. шк., 1980. – 408 с.
3. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / ред. совет В. Н. Челомей [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1978–1981. – Т. 2 : Колебания нелинейных механических систем / под ред. И. И. Блехмана. – 1979. – 351 с.
4. Власов, А. А. Исследование динамической системы балансірного электрододержателя дуговой сталеплавильной печи / А. А. Власов, С. В. Зданевич // *Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Дніпро*, 2018. – Вип. 4 (117). – С. 10–18.
5. Власов, О. А. Вибір жорсткості пружних елементів гасителя коливань балансірного електродотримача дугової сталеплавильної печі / О. А. Власов, С. В. Зданевич // *Теория и практика металлургии*. – 2017. № 1-2. – С. 77–81.
6. Гидаспов, И. А. Динамика самотормозящихся механизмов / И. А. Гидаспов, В. Л. Вейц. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 140 с.
7. Горева, Л. П. Электродинамические взаимодействия в дуговых сталеплавильных печах / Л. П. Горева, Р. А. Бикеев, Д. С. Власов // *Известия высш. учеб. завед. Электромеханика*. – 2012. – № 6. – С. 55–58.
8. Грезина, А. В. Математическое моделирование динамики системы электрододержателей дуговых сталеплавильных печей / А. В. Грезина // *Вестн. Сарат. гос. техн. ун-та*. – 2004. – № 4. – С. 5–10.
9. Марущак, Я. Ю. Математическая модель механизма перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи на основе представления Денавита-Хартенберга / Я. Ю. Марущак, А. П. Кушнир // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2016. – № 22 (98). – С. 20–27.
10. Пат. 43610А, Україна, МПК Н 05 В 7/10. Пристрій для кріплення електродотримача дугової сталеплавильної печі / Власов А. О., Коваль М. В., Жук А. Я., Лебедева И. В., Беляев С. Ю., Бейник В. В. ; заявник та патентовласник Запорізь. держ. інж. акад. – № 2001042291 ; заявл. 06.04.2001 ; опубл. 17.12.2001, Бюл. № 11.
11. Про підвищення надійності роботи електродів дугових сталеплавильних печей / М. В. Коваль, В. К. Тарасов, С. С. Пилипенко, Ю. П. Єгоров, А. О. Власов // *Металургія : зб. наук. пр. / Запорізь. держ. інж. акад.* – Запоріжжя, 2016. – Вип. 1 (35). – С. 58–62.
12. Сапко, А. И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей / А. И. Сапко. – Москва : Энергия, 1980. – 134 с.
13. Турпаев, А. И. Самотормозящие механизмы / А. И. Турпаев. – Москва : Машиностроение, 1976. – 208 с.
14. Brusa E. G. M. Compact Modeling of Electric Arc Furnace Electrodes for Vibration Analysis, Detection and Suppression / E. G. M. Brusa, E. Franceschinis, S. Morsut // *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. – 2009. – Vol. 42, No. 2. – P. 75–106.
15. Brusa, E. G. M. Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity / E. G. M. Brusa, S. Morsut // *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*. – 2015. – Vol. 20. – Iss. 3. – P. 1099–1107. doi: 10.1109/TMECH.2014.2364392
16. Computer modeling and experimental validation of an electric arc furnace [Електронний ресурс] / P. Grygorov, E. Hovestadt, O. N. Jepsen, H. J. Odenthal, F. Theobald // 10th European Electric Steelmaking Conf. : Conf. Paper. – Graz, 2012. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/279206081_Computer_modelling_and_experimental_validation_of_an_Electric_Arc_Furnace – Назва з екрана. – Перевірено : 13.07.2018.

17. Gerhan, R. E. Secondary system mechanical resonance in new tall-shell SDI-butler arc furnaces: Detection and solutions / R. E. Gerhan, Y. Krotov, N. Lugo // AISTech 2010 : Iron and steel technology conf. proc. (May 3–6, Pittsburgh, Pa., USA). – Pittsburgh, 2010. – P. 947–957.
18. Lupi, S. Fundamentals of Electroheat. Electrical Technologies for Process Heating / S. Lupi. – Cham : Springer International Publishing Switzerland, 2017. – 620 p. doi: 10.1007/978-3-319-46015-4
19. Nikolaev, A. A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, D. A. Savinov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (16–19 May 2017). – Saint Petersburg, Russia, 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205

A. A. ВЛАСОВ^{1*}, С. В. ЗДАНЕВИЧ^{2*}

^{1*}Каф. «Металлургическое оборудование», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (061) 227 12 42, эл. почта vlasovzgia@ukr.net, ORCID 0000-0003-3253-6435

^{2*}Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +038 (050) 452 79 52, эл. почта sergzd@i.ua, ORCID 0000-0001-8594-3806

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОДА

Цель. В научной работе необходимо: 1) разработать математическую модель и определить динамические параметры механической системы балансирного электрододержателя дуговой сталеплавильной печи; 2) выполнить сравнительную оценку максимальных амплитуд и характера вынужденных и свободных затухающих колебаний электрода в горизонтальной плоскости после сбрасывания электродинамической нагрузки для балансирного электрододержателя и электрододержателя с жестким креплением рукава к стойке; 3) определить характеристики демпфера сухого трения на основе ортогонального клинового механизма с начальным натягом линейных упругих элементов при условии учета возможных амплитуд и частот колебаний электрододержателя. **Методика.** Поставленная задача решалась с помощью методов теоретической механики и теории колебаний, динамического анализа механической системы электрододержателей с учетом нестационарного электродинамического возбуждения. Моделирование механических колебаний электрода в горизонтальной плоскости осуществлялось средствами MathCAD. **Результаты.** Рассмотрена динамическая система балансирного электрододержателя на основе двойного физического маятника с упруго-диссипативными связями. Определены параметры динамической модели и электродинамического возбуждения колебаний. Составлены дифференциальные уравнения вынужденных колебаний диссипативной системы с двумя степенями свободы. Выполнено математическое моделирование вынужденных и свободных колебаний электрода в горизонтальной плоскости. Доказана возможность уменьшения амплитуд колебаний электродов в системе балансирного электрододержателя во время действия электродинамического возбуждения и сброса нагрузки. **Научная новизна.** Впервые выполнен динамический синтез системы балансирных электрододержателей дуговой сталеплавильной печи с учетом изменения динамических параметров механической системы электрододержателей и возможных электродинамических воздействий на токопроводящие элементы несущей конструкции и электрод. Динамический синтез и анализ таких конструкций электрододержателей ранее не выполнялся. **Практическая значимость.** Разработанные практические рекомендации и аналитические зависимости по выбору динамических параметров механической системы балансирного электрододержателя при условии минимального отклонения электрода от начального положения в горизонтальной плоскости. Предложена конструкция демпфера сухого трения на основе ортогонального клинового механизма с линейными упругими элементами и их начальным натягом.

Ключевые слова: механизм перемещения электродов; балансирный электрододержатель; динамическая система; электродинамические силы; колебания; амплитуда

A. O. VLASOV^{1*}, S. V. ZDANEVICH^{2*}

^{1*}Dep. «Metallurgical Equipment», Zaporizhzhia State Engineering Academy, Soborny Av., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (061) 227 12 42, e-mail vlasovzgia@ukr.net, ORCID 0000-0003-3253-6435

^{2*}Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 452 79 52, e-mail sergzd@i.ua, ORCID 0000-0001-8594-3806

IMPROVING THE MECHANICAL SYSTEM OF THE ELECTRODE HOLDER TO REDUCE ELECTRODE VIBRATION

Purpose. The article is aimed to: 1) develop a mathematical model and determine the dynamic parameters of a mechanical system of balanced electrode holder of electric arc furnace; 2) perform a comparative estimation of the maximum amplitudes and the nature of forced and free decaying oscillations of the electrode in the horizontal plane after the electrodynamic load drop for the balanced electrode and the electrode holder with a rigid mount of the sleeve to the rack; 3) determine the characteristics of the dry friction damper based on the orthogonal wedge mechanism with the initial tension of the linear elastic elements, subject to the possible amplitudes and frequencies of oscillations of the electrode holder **Methodology.** The solution is carried out by the methods of theoretical mechanics and the theory of oscillations, dynamic analysis of the electrode holder mechanical system taking into account non-stationary electrodynamic excitation. Simulation of mechanical oscillations of the electrode in the horizontal plane was carried out by means of MathCAD **Findings.** The dynamical system of the balanced electrode holder of three-phase electric arc furnace on the basis of a double physical pendulum with elastic dissipative bonds is considered. The parameters of the dynamic model and electrodynamic excitation of oscillations are determined. Differential equations of forced oscillations of a dissipative system with two degrees of freedom are formulated. The mathematical modeling of forced and free oscillations of an electrode in a horizontal plane is executed. **Originality.** The dynamic synthesis of the balanced electrode holders of the electric arc furnace is carried out for the first time, taking into account the possible electrodynamic effects on the current-carrying elements of the bearing structure and the electrode. Dynamic synthesis and analysis of such structures of electrode holders was not performed before. **Practical value.** Practical recommendations and analytical dependencies for choosing the dynamic parameters of mechanical system of balanced electrode holder under condition of minimum deviation of the electrode from the initial position in the horizontal plane are developed. The design of dry friction damper based on orthogonal wedge mechanism with linear elastic elements and their initial tension is proposed.

Keywords: mechanism for moving the electrode; balanced electrode holder; dynamic system; electrodynamic forces; oscillation; amplitude

REFERENCES

1. Bershitskiy, I. M., Voenny, V. A., & Nikulin, A. A. (2001). Elektrododerzhateli dugovykh pechey. *Elektrometallurgiya*, 5, 22-28. (in Russian)
2. Biderman, V. L. (1980). *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy: Uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
3. Blekhan, I. I. (Ed). (1979). Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh system. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik: in 6 Vol.* (Vol. 2, 351 p.). Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
4. Vlasov, A. A., & Zdanevich, S. V. (2018). Issledovanie dinamicheskoy sistemy balansirnogo elektrododerzhatelya dugovoy stale-plavilnoy pechi. *System Technologies*, 4(117), 10-18. (in Russian)
5. Vlasov, O. A., & Zdanevich, S. V. (2017). Vybir zhorstkosti pruzhnykh elementiv hasytelia kolyvan balansyrnogo elektrodotrymacha duhovoiv staleplavilnoy pechi. *Teoriya y praktyka metallurhyy*, 1-2, 77-81. (in Ukrainian)
6. Gidaspov, I. A. & Veyts, V. L. (1987). *Dinamika samotormozyashchikhsya mekhanizmov*. Leningrad. (in Russian)
7. Goreva L. P., Bikeev R. A., & Vlasov D. S. (2012). Electrodynamic Interactions in Arc Steel Furnaces. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, 6, 55-58. (in Russian)
8. Grezina, A. V. (2004). Matematicheskoe modelirovanie dinamiki sistemy elektrododerzhatelye dugovykh staleplavilnykh pechey. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 4, 5-10. (in Russian)

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

9. Marushchak, Y. Y., & Kushnir, A. P. (2016). Matematicheskaya model mekhanizma peremeshcheniya elektrodov dugovoy staleplavil-noy pechi na osnove predstavleniya Denavita-Khartenberga. *Electrotechnic and Computer Systems*, 22(98), 20-27. (in Russian)
10. Vlasov, A.O., Koval, M.V., Zhuk, A.Y., Lebedeva, Y.V., Beliaev, S.Y., & Beinyk, V.V. (2001). *UA Patent No. 43610A*. Kyiv: Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent). (in Ukrainian)
11. Koval, M. V., Tarasov, V. K., Pylypenko, S. S., Yehorov, Y. P., & Vlasov, A. O. (2016). Pro pidvyshchennia nadiinosti roboty elektrodiv duhovyykh staleplavlynykh pechei. *Metalurhiia: zbirnyk naukovykh prats*, 1(35), 58-62. (in Ukrainian)
12. Sapko, A. I. (1980). *Ispolnitelnye mekhanizmy regulyatorov moshchnosti dugovykh elektropechey*. Moscow: Energiya. (in Russian)
13. Turpaev, A. I. (1976). *Samotormozyashchie mekhanizmy*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
14. Brusa, E. G. M., Franceschinis, E., & Morsut, S. (2009). Compact Modeling of Electric Arc Furnace Electrodes for Vibration Analysis, Detection and Suppression. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 42(2), 75-106. (in English)
15. Brusa, E. G. M., & Morsut, S. (2015) Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 20(3), 1099-1107. doi: 10.1109/TMECH.2014.2364392 (in English)
16. Grygorov, P., Hovestadt, E., Jepsen, O. N., Odenthal, H. J., & Theobald F. (2012). *Computer modeling and experimental validation of an electric arc furnace*, 10th European Electric Steelmaking Conference, September. Graz. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/279206081> (in English)
17. Gerhan, R. E., Krotov, Y., & Lugo, N. (2010). *Secondary system mechanical resonance in new tall-shell SDI-butler arc furnaces: Detection and solutions*, AISTech Conference: Iron and steel technology conference proceeding, May 3-6, Pittsburgh, Pa., USA. Pittsburgh. (in English)
18. Lupi, S. (2017). *Fundamentals of Electroheat, Electrical Technologies for Process Heating*. Springer International Publishing Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-46015-4 (in English)
19. Nikolaev, A. A., Tulupov, P. G., & Savinov, D. A. (2017). *Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs*, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16-19 May. Saint Petersburg, Russia. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205 (in English)

Надійшла до редколегії: 30.04.2018

Прийнята до друку: 02.08.2018

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.833

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}^{1*}Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76, ел. пошта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

ПОВТОРЮВАНІ ЗВ'ЯЗКИ У СХЕМАХ СТРИЖНЬОВОГО ПОВЗУННО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Мета. Робота має за мету провести структурний аналіз захоплювального пристрою, який є механізмом змінної структури із зовнішніми неутримуючими зв'язками. Також потрібно визначити кількість повторюваних зв'язків у внутрішніх і зовнішніх контурах схеми механізму та з'ясувати способи їх зменшення. **Методика.** Досягнення поставленої мети здійснюється засобами теорії механізмів і машин за допомогою універсальної структурної теорії Озолса для аналізу механізму захвату як механізму із внутрішніми і зовнішніми зв'язками. **Результати.** Проектування схем механічних захватних пристроїв рідко передбачає етап структурного аналізу і синтезу механізму. Надається перевага обов'язковим кінематичному та кінетостатичному розрахункам, компоновці та конструюванню. Якщо структурний аналіз і виконується, то найчастіше він обмежується обчислюванням числа ступенів свободи механізму. Десятиланковий стрижньовий механізм захвату побудований на основі спареного паралелограмного кривошипно-повзунного механізму з ведучим повзуном. Ведучий повзун впливає на шатуни, що з'єднані коромислами зі станиною. На продовженні шатунів шарнірно закріплені ланки, що містять затискні елементи захвата. Додані діади утворюють паралелограм і забезпечують плоскопаралельний рух затискних елементів захвату. Структурний аналіз виконувався за схемами для двох станів механізму: до затиску об'єкту і в стані затиснутого об'єкта. Основні внутрішні структурні параметри кінематичної схеми: число ланок – 10, число з'єднань – 13, число контурів – 4, рухомість – 1, кількість внутрішніх повторюваних зв'язків – 11. Число зовнішніх зв'язків – 12, фактична рухомість механізму – 1, робоча рухомість механізму – 0, число втрачених рухомостей зовнішніх тіл від дії зовнішніх зв'язків – 6, кількість зовнішніх повторюваних зв'язків – 5. **Наукова новизна.** Вперше проведений структурний аналіз спареного повзунно-шатунного механізму захоплювального пристрою як механізму змінної структури з внутрішніми та зовнішніми зв'язками. Виконані поконтурний пошук, аналіз та усунення шкідливих повторюваних зв'язків у внутрішніх та зовнішньому контурах механізму. **Практична значимість.** Запропоновані практичні рекомендації щодо зміни рухливостей кінематичних пар для зменшення кількості повторюваних зв'язків у внутрішніх контурах та введення розвантажувального з'єднання у зовнішній контур механізму.

Ключові слова: механічний захват; структурний аналіз; рухомість механізму; повторювальні зв'язки; зовнішні зв'язки

Вступ

Робочий орган промислового робота, який призначений для захоплення й утримання об'єкта маніпулювання, називають захоплювальним (захватним, хватом) пристроєм. Механізми захватів роботів і маніпуляторів є окремими пристроями з індивідуальним приводом. Кінематичні схеми захватів не складні, мають невелику кількість рухомих ланок, переважно з однією рухомістю.

Основні переваги механізмів без повторюваних зав'язків [4, 8] наступні:

- такі механізми статично визначені й не мають додаткових реакцій, не викликаних дією зовнішнього корисного навантаження;
- вони не чутливі до пружних деформацій і незначного відхилення розмірів ланок механізму і станини;
- легко збираються, не потребують підгону й приробітки;
- у них рідше утворюються зазори й менше зношування у кінематичних парах;
- мають вищу надійність і нижчу вартість експлуатації.

Тому під час проектування й модернізації механізмів захватів необхідно закладати в їх конструкцію статично визначні схеми, оскільки

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

за всіх інших рівних умов вони гарантують отримання більш ефективного механізму.

Механізми захватів мають змінну структуру з різними основними параметрами схем, тому їх аналіз проводять двічі: до та після затиску об'єкта затискними елементами захвату, під час якого накладаються зовнішні зв'язки, серед них є неутримуючі [2]. Структурний аналіз окремих кулісних механізмів захватів виконаний у роботах [6, 7, 14].

Десятиланковий стрижньовий механізм захвату побудований на основі спареного паралелограмного кривошипно-повзунного механізму з ведучим повзуном. Ведучий повзун 1 (рис. 1, а) впливає на шатуни 2 і 6, що з'єднані коромислами 3 і 7 зі станиною 0. На продовженні шатунів шарнірно закріплені ланки 4 й 8, що містять затискні елементи захвату. Додані діади 4–5 та 8–9 утворюють паралелограм і забезпечують плоскопаралельний рух затискних елементів захвату. Кінематичний синтез механізму має бути виконаний таким чином, що траєкторія точок на кінцях шатунів 2 і 6 на певній ділянці руху описує пряму лінію, а шатуни 4 й 8 здійснюють прямолінійний рух. Структурний аналіз і раціональний кінематичний синтез стрижньового кулісного механізму захвата виконаний у роботі [7].

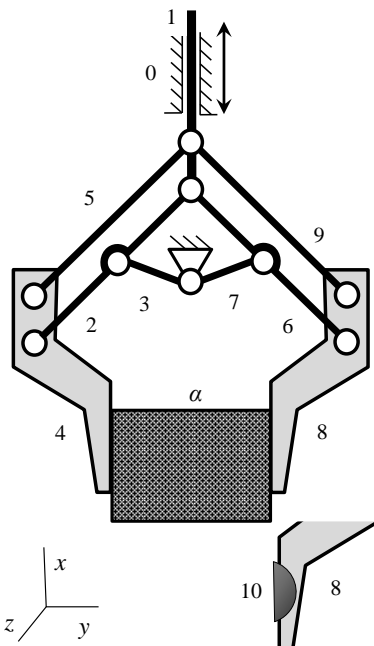


Рис. 1. Кінематична схема повзунно-шатунного механізму захвата

Fig. 1. Kinematic scheme of the slider-crank mechanism of gripping device

Зазвичай вантажозахватні паралелограмні механізми мають підвищену вантажопідйомність, і без спеціального профілювання затискних елементів об'єктом маніпулювання є деталі призматичної форми.

Сьогодні накопичений значний досвід дослідження й проектування різних схем і конструкцій захватів різного призначення [1, 3, 5, 9, 11, 12, 15]. При цьому проектування схем механічних захватних пристроїв, на жаль, майже ніколи не передбачає етапу структурного аналізу й синтезу механізму. Перевага надається обов'язковому кінематичному й кінетостатичному розрахункам, компонованню й конструюванню [5, 9]. Якщо структурний аналіз і виконується, то найчастіше він обмежується обчислюванням числа ступенів свободи механізму, а для маніпулятора в цілому ще й з'ясуванням його маневреності. Найважливіший структурний параметр будь-якого механізму – наявність у схемі повторюваних (надлишкових) зв'язків – часто залишається не визначеним, а, отже, і не застосовано дій щодо їх зменшення.

Мета

Основна мета роботи – провести структурний аналіз повзунно-шатунного захоплювального пристрою, який є механізмом змінної структури із зовнішніми неутримуючими зв'язками. Також потрібно визначити кількість і розташування повторюваних зв'язків у внутрішніх і зовнішніх контурах схеми механізму та з'ясувати способи їх зменшення.

Методика

Досягнення поставленої мети здійснюється засобами теорії механізмів і машин за допомогою універсальної структурної теорії Озолса для аналізу механізму захвата як механізму із внутрішніми і зовнішніми зв'язками.

Результати

Складний структурний аналіз із визначенням повторювальних зав'язків (ПЗ) зручно виконувати не за кінематичною схемою, а побудованою на її основі структурній [4], або за схемою з використанням графів [8]. Ведуча пара на структурній схемі зображена подвійним концентричним колом, ведучі ланки – фігурами

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

з точковим штрихуванням, арабськими цифрами позначені ланки, римськими – клас (число зв'язків) кінематичних пар. Згідно [4] будь-який механізм, навіть просторовий, може бути зображений пласкою структурною схемою.

Перший етап – до затиску об'єкту. Одношарова симетрична складна напіввідкрита з чотирма базовими ланками структурна схема механізму (рис. 2, а) складається з дев'яти рухомих ланок, тринадцяти з'єднань і чотирьох контурів (четвертого класу). Основні внутрішні структурні параметри кінематичного ланцюга: число ланок $n = 10$, число з'єднань $p = 13$ та число контурів $k = 4$. Перевірка за основною геометричною залежністю $p = n + k - 1$ ($13 = 10 + 4 - 1$) свідчить про правильність побудови структурної схеми.

Основна рухомість плаского механізму може бути порахована за відомою пласкою формулою Малишева [8]

$$W = 3(n - 1) - 2p_V - p_{IV},$$

де p_{IV} – число однорухомих пар (V класу), p_{IV} – число дворухомих пласких пар (IV класу). У схемі всі 13 пар однорухомі (ведуча пара 0–1 має другу рухомість у площині, перпендикулярній площині схеми, тому у площині схеми ця пара є парою V класу), і число ступенів свободи механізму дорівнює одиниці $W = 3(10 - 1) - 2 \cdot 13 = 1$.

Загальне число ПЗ знайдемо за формулою Озолса [4]

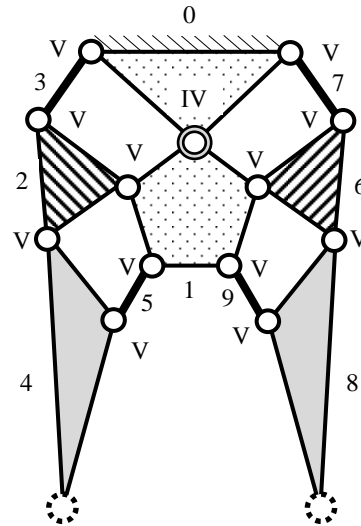
$$\sigma = W + 6k - f, \quad (1)$$

де загальне число рухливостей усіх з'єднань складе $f = 12 \cdot 1 + 1 \cdot 2 = 14$, а $\sigma = 1 + 6 \cdot 4 - 14 = 11$. У симетричних і топологічно однакових чотирьох контурах утворюються по три ПЗ. Загальна для обох контурів оберտальна рухомість самовстановлення ведучого повзуна, що використовується при збиранні в одному контурі (наприклад, 0-1-2-3) і зменшує кількість ПЗ, вже не може бути використана для самовстановлення в іншому (0-1-6-7). Тому в одному контурі (0-1-2-3) утворюються два ПЗ, а в іншому (0-1-6-7) – три.

У контурах паралелограмів 1-2-4-5 і 1-6-8-9 можлива непаралельність осей шарнірів може

створити вигин і скручування шатунів, і ці деформації будуть викликані дією ПЗ, а не дією зовнішньої сили [10, 13].

a – a



b – b

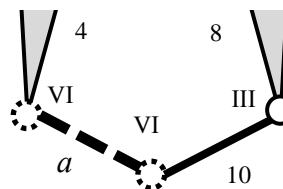
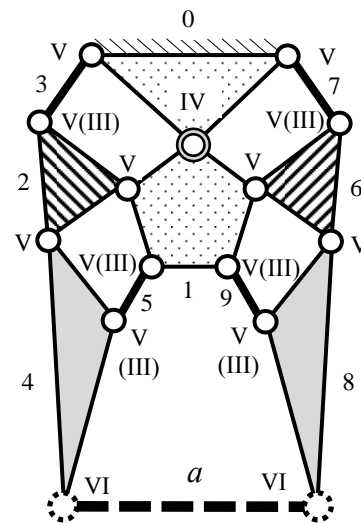


Рис. 2. Структурні схеми повзунно-шатунного механізму захвата на різних етапах його роботи:

a – до затиску об'єкта; *b* – об'єкт затиснутий

Fig. 2. Structural diagrams of the slider-crank mechanism of gripping device at different stages of its operation:

a – before clamping the object;

b – the object is clamped

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Ефективним способом зменшення кількості ПЗ є зниження класу кінематичних пар. На рис. 2, б в дужках представлені рекомендовані для заміни класи кінематичних пар, які дозволяють зменшити кількість ПЗ у внутрішніх контурах. Сполуки шатунів 3 і 7 з коромислами 2 і 6, а також обидві пари шатунів 5 і 9 виконані сферичними шарнірами III класу. Місцева рухливість ланок 4 і 8 за очевидними причинами не може бути дозволена встановленням сферичних кінцевих шарнірів. Тоді загальна рухомість всіх пар складе $f = 6 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 6 = 26$, з'являться дві місцеві рухливості – обертання шатунів 5 і 9 навколо своїх поздовжніх осей, які додадуться до основної рухомості, а кількість внутрішніх ПЗ за формулою (1) складе $\sigma = (1 + 2) + 6 \cdot 4 - 26 = 1$, тобто залишиться один ПЗ загальний для контурів 0-1-6-7 та 0-1-2-3.

Другий етап – об'єкт затиснутий (рис. 2, б). Структура механізму змінилася і накладені зовнішні зв'язки. Оскільки механізми захватів завжди мають зовнішні зв'язки, то згідно універсальній структурній теорії Озолса розглядати їх потрібно з двох позицій. По-перше, в ізоляції від зовнішніх тіл, з якими він має зовнішні зв'язки (ізолювано від об'єкта маніпулювання); число ступенів свободи при усунених зовнішніх зв'язках називають фактичною рухомістю механізму (W_ϕ). По-друге, в робочому стані, коли діють зовнішні зв'язки (об'єкт затиснутий); рухомість при діючих зовнішніх зв'язках – робоча рухомість механізму (W_p). W_p менша за W_ϕ на кількість накладених зовнішніх зв'язків. Перший випадок відповідає стану механізму вільного від об'єкта маніпулювання, другий – стану механізму, коли об'єкт затиснутий.

Оскільки тепер механізм має зовнішні зв'язки, то для подальшого аналізу доцільно використовувати зовнішню структурну формулу, яка дозволяє встановити у такому механізмі кількість зовнішніх ПЗ:

$$\sigma_a = S_a - (W_\phi - W_p) - W_a, \quad (2)$$

де S_a – число зовнішніх зв'язків, W_a – число втрачених рухомостей зовнішніх тіл від дії зовнішніх зв'язків.

Після затиску деталі a в схемі утворюється ще один контур 1-5-4- a -8-9, а механізм і зовні-

шне тіло повністю втрачають рухомість $W_p = 0$. При плоских затискних елементах та достатнього тертя між ними і об'єктом захвату останній не може рухатися відносно механізму, тому вважаємо, що у зовнішніх парах 4- a і a -8 за цих умов утворюються нерухомі з'єднання VI класу. Важливо відзначити, що зовнішні з'єднання стають здатними передати силу уздовж осі x і здійснювати всі голономні [2] фрикційні зв'язки тільки тоді, якщо обидві ланки 8 і 4 затискають об'єкт.

Кількість зовнішніх ПЗ за залежністю (2): $\sigma_a = 12 - (1 - 0) - 6 = 5$. Три ПЗ утворюються під час накладання фрикційних голономних зв'язків, двічі обмежують передачу моменту навколо осі y і передачу сил уздовж осей x і z . Кінематично було б достатньо, щоб зазначені фрикційні зв'язки накладав один затискний елемент захвату. Решта два з виявлених зовнішніх ПЗ вимагають суворого дотримання паралельності поверхонь затискних елементів захвату і бічних поверхонь деталі в двох взаємно перпендикулярних площинах. Для їх усунення без зміни форми контактуючих поверхонь необхідне введення в схему розвантажувального з'єднання, здатного компенсувати перекося при затиску об'єкта. Таким з'єднанням може бути сферична пара 10–8 (рис. 1, знизу праворуч). Після її введення непаралельність сторін об'єкту буде компенсована самовстановленням. Усунення цих ПЗ тим більш важливі, що їх дія має багаторазовий імпульсний характер, повторюється при затисканнях і породжує два реактивних моменти, які не викликані дією сил затиску.

На рис. 2, б (внизу) показана структурна схема механізму розглянутого захвату, яка позбавлена шкідливих ПЗ. Після введення трирухомого розвантажувального з'єднання перед накладенням зовнішніх зв'язків фактична рухомість складе $W_\phi = 1 + 3 = 4$; тут додаються три місцеві рухливості ланки 10. Тепер отримуємо $\sigma_a = 12 - (4 - 0) - 6 = 2$, тобто залишаються два голономних зовнішніх ПЗ, що подвійно обмежують переміщення об'єкта затискання за двома координатами у площині zOy . Їх дія зменшує питомий тиск у зоні контакту та підвищує вантажопідйомність механізму захвату, тому вони не шкідливі [16].

Захватний пристрій, виконаний за пропонуваною схемою, де кількість внутрішніх та зовні-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

шніх повторюваних зв'язків мінімальне, безумовно має більш високі експлуатаційні показники.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше проведений структурний аналіз спареного повзунно-шатуного механізму захоплювального пристрою як механізму змінної структури з внутрішніми та зовнішніми зв'язками. Виконані поконтурний пошук, аналіз та усунення шкідливих повторюваних зв'язків у внутрішніх та зовнішньому контурах механізму.

Запропоновані практичні рекомендації щодо зміни рухливостей кінематичних пар для зменшення кількості повторюваних зв'язків у внутрішніх контурах та введення розвантажувального з'єднання у зовнішній контур механізму.

Висновки

Надійність механізмів захватів, як і надійність будь-яких механізмів, суттєво залежить від правильності побудови механізму, вдалого

пошуку та усунення шкідливих повторюваних зв'язків.

У найбільш поширених механізмах захватів із паралельними та спареними механізмами зазвичай велика кількість повторюваних зв'язків у внутрішніх та зовнішніх контурах і змінна структура. Для виявлення та усунення внутрішніх та зовнішніх повторюваних зв'язків зручно застосувати узагальнену структурну формулу О. Озолса.

Після аналізу, пошуку і усунення внутрішніх повторюваних зв'язків, необхідний аналіз схеми зі зміненою структурою, коли утворюється зовнішній незалежний контур між ланками механізму і затиснутим об'єктом маніпулювання. Усунення шкідливих повторюваних зв'язків у зовнішньому контурі можливі за рахунок зниження класу зовнішніх кінематичних пар або введення розвантажувального з'єднання для компенсації перекосів поверхонь затискних елементів і об'єкта маніпулювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боренштейн, Ю. П. Исполнительные механизмы захватывающих устройств / Ю. П. Боренштейн. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 302 с.
2. Герц, Г. Принципы механики, изложенные в новой связи / Г. Герц. – Москва, 1959. – 380 с.
3. Механика промышленных роботов : учеб. пособие для вузов : в 3 кн. / под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 2 : Расчет и проектирование механизмов / Е. И. Воробьев, О. Д. Егоров, С. А. Попов. – Москва : Высш. шк., 1988. – 367 с.
4. Озол, О. Г. Основы конструирования и расчета механизмов / О. Г. Озол. – Рига : Звайгзне, 1979. – 360 с.
5. Павленко, І. І. Загальна методика розрахунку та проектування конструкцій захватних пристроїв промислових робіт / І. І. Павленко, М. О. Годунко, І. Д. Кіріченко // Зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. Техніка в с.-г. вир-ві, галузеве машинобуд., автоматизація. – Кіровоград, 2013. – № 26. – С. 67–70.
6. Погребняк, Р. П. Пошук та усунення надлишкових зв'язків у захоплюючих пристроях (захоплювачах) механізмів маніпуляторів / Р. П. Погребняк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 7 (296). – С. 91–95.
7. Погребняк, Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез стрижньового кулісного механізму захвата / Р. П. Погребняк // *Підйомно-транспортна техніка*. – 2017. – № 2 (54). – С. 47–56.
8. Решетов, Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы / Л. Н. Решетов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 334 с.
9. Челпанов, И. Б. Схваты промышленных роботов / И. Б. Челпанов, С. Н. Колпашников. – Ленинград : Машиностроение, 1989. – 287 с.
10. Atarer, F. Design alternatives of network of Altman linkages / F. Atarer, K. Korkmaz, G. Kiper // *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 495–503. doi: 10.2495/CMEM-V5-N4-495-503
11. Belfiore, N. P. An atlas of linkage-type robotic grippers / N. P. Belfiore, E. Pennestri // *Mechanism and Machine Theory*. – 1997. – Vol. 32. – Iss. 7. – P. 811–833. doi: 10.1016/s0094-114x(97)00006-2
12. Robot grippers / Gareth J. Monkman, Stefan Hesse, Ralf Steinmann, Henrik Schunk. – Weinheim : Wiley-VCH; 2007. – 463 p. doi: 10.1002/9783527610280

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

13. Pfulner, M. Algebraic analysis of overconstrained single loop four link mechanisms with revolute and prismatic joints / M. Pfulner, T. Stigger, M. L. Husty // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – Vol. 114. – P. 11–19. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.014
14. Pogrebnyak, R. P. Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device / R. P. Pogrebnyak // Теория и практика металлургии. – 2015. – № 1-2. – С. 123–125.
15. Robot Grippers (International trends in manufacturing technology) / Ed. by Pham D. T., Haginbotham W. B. – Bedford : IFS, 1986. – 443 p.
16. Schlenoff, C. Robust grasp preimages under unknown mass and friction distributions / C. Schlenoff, S. Balakirsky, H. Christensen // Integrated Computer-Aided Engineering. – 2018. – Vol. 25. – Iss. 2. – P. 99–110. doi: 10.3233/ICA-180568

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ СВЯЗИ В СХЕМАХ СТЕРЖНЕВОГО ПОЛЗУННО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Цель. Работа своей целью имеет проведение структурного анализа захватывающего устройства как механизма переменной структуры с внешними неудерживающими связями. Также необходимо определить количество повторяющихся связей во внутренних и внешних контурах схемы механизма и выяснить способы их уменьшения. **Методика.** Решение поставленной задачи осуществляется средствами теории механизмов и машин с помощью универсальной структурной теории Озолса для анализа механизма схвата как механизма с внутренними и внешними связями. **Результаты.** Проектирование схем механических захватных устройств редко предусматривает этап структурного анализа и синтеза механизма, отдается предпочтение обязательным кинематическому и кинетостатическому расчетам, компоновке и конструированию. Если структурный анализ и выполняется, то чаще всего он ограничивается вычислением числа степеней свободы механизма. Десятизвенный стержневой механизм схвата построен на основе спаренного параллелограммно-кривошипно-ползунного механизма с ведущим ползуном. Ведущий ползун воздействует на шатуны, соединенные коромыслами со станиной. На продолжении шатунов шарнирно закреплены звенья, несущие зажимные элементы схвата. Добавленные диады образуют параллелограмм и обеспечивают плоскопараллельное движение зажимных элементов схвата. Структурный анализ выполнялся по схемам для двух состояний механизма: до зажима объекта и в состоянии зажатого объекта. Основные внутренние структурные параметры кинематической схемы: число звеньев – 10, число соединений – 13, число контуров – 4, подвижность – 1, количество внутренних повторяющихся связей – 11. Число внешних связей – 12, фактическая подвижность механизма – 1, рабочая подвижность механизма – 0, число утраченных подвижностей внешнего тела от действия внешних связей – 6, количество внешних повторяющихся связей – 5. **Научная новизна.** Впервые проведен структурный анализ спаренного ползунно-шатунного механизма захватывающего устройства как механизма переменной структуры с внутренними и внешними связями. Выполнены поконтурный поиск, анализ и устранение вредных повторяющихся связей во внутренних и внешних контурах механизма. **Практическая значимость.** Предложены практические рекомендации по изменению подвижностей кинематических пар для уменьшения количества повторяющихся связей во внутренних контурах и введения разгрузочного соединения в наружном контуре механизма.

Ключевые слова: механический схват; структурный анализ; подвижность механизма; повторяющиеся связи; внешние связи

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, 49005, Dnipro, tel. +038 (056) 743 32 76, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

REPEATED CONNECTIONS IN THE SCHEMES OF LINK SLIDER-CRANK MECHANISM OF GRIPPING DEVICE

Purpose. The article is aimed to carry out a structural analysis of gripping device as a mechanism with a variable structure and external unilateral constraints, as well as to determine the number of repeated connections in the internal and external contours in the mechanism diagram, and to recommend the ways to reduce them. **Methodology.** Solution of the set problem is realized by means of the mechanisms and machines theory using the universal structural theory of Ozols for analyzing the gripping device as a mechanism with internal and external constraints. **Findings.** The design of schemes of mechanical gripping devices rarely provides for a stage of structural analysis and synthesis of the mechanism. The preference is given to mandatory kinematic and kinetostatic calculations, layout and design. If structural analysis is carried out, then most often it is limited to calculating the number of the mechanism freedom degrees. The ten-link gripping device is built on the basis of coupled parallelogram slider-crank mechanism with a leading slider. The leading slider acts on the connecting rods connected by the rocker with the frame. The connecting rods bear the clamping elements of the gripping device. The added dyads form a parallelogram and provide a plane-parallel movement of the gripping elements of clamp. Structural analysis was performed using structural schemes for two states of the mechanism: before clamping the object and in the state of the clamped object. The main internal structural parameters of the kinematic scheme: the number of links - 10, the number of connections - 13, the number of contours - 4, the mobility - 1, the number of internal repeated connections - 11. The number of external connections - 12, the actual mobility of the mechanism - 1, the working mobility of the mechanism is - 0, the number of lost mobilities of the external body from the action of external connections - 6, the number of external repeated connections - 5. **Originality.** Structural analysis of the coupled slider crank mechanism of the gripping device as a mechanism of a variable structure with internal and external connections is carried out for the first time. It is performed contour search, analysis and elimination of useless repeated connections in the internal and external contours of the mechanism. **Practical value.** Practical recommendations for changing the mobility of kinematic pairs are proposed to reduce the number of repeated connections in internal contours and to provide unloading connection in the outer contour of the mechanism.

Keywords: mechanical gripping device; structural analysis; mobility of mechanism; repeated connections; external connections

REFERENCES

1. Borenshteyn, Y. P. (1982). *Ispolnitelnye mekhanizmy zakhvatyvyayushchikh ustroystv*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
2. Gerts, G. (1959). *Printsipy mekhaniki, izlozhennyye v novoy svyazi*. Moscow. (in Russian)
3. Vorobov, Y. I., Yegorov, O. D., & Popov, S. A. (1988). *Mekhanika promyshlennykh robotov*. In K. V. Frolov, Y. I. Vorobov (Eds.). *Raschet i proyektirovanie mekhanizmov*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
4. Ozol, O. G. (1979). *Osnovy konstruirovaniya i rascheta mekhanizmov*. Riga: Zvaygzne. (in Russian)
5. Pavlenko, I. I., Godunko, M. O., & Kirichenko I. D. (2013). *Zagalna metodika rozrakhunku ta proektuvannya konstruktsiy zakhvatnikh pristroiv promislivikh robotiv*. *Zbirnik naukovikh prats Kirovogradskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universitetu. Tekhnika v silskogospodarskomu virobnitstvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatizatsiya*, 2, 67-70. (in Ukrainian)
6. Pogrebnyak, R. P. (2015). *Poshuk ta usunennya nadlishkovikh zv'yazkiv u zakhoplyuyuchykh pristroyakh (zakhoplyuvachakh) mekhanizmiv manipulyatoriv*. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 7, 91-95. (in Ukrainian)
7. Pogrebnyak, R. P. (2017). *Strukturniy analiz i kinematychniy sintez strizhnovogo kulisnogo mekhanizmu zakhvata*. *Pidyomno-transportna tekhnika*, 2(54), 47-56. (in Ukrainian)
8. Reshetov, L. N. (1979). *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy*. Moscow: Mashinostroyeniye. (in Russian)
9. Chelpanov, I. B., & Kolpashnikov, S. N. (1989). *Skhvaty promyshlennykh robotov*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
10. Atarer, F., Korkmaz K., & Kiper G. (2017). Design alternatives of network of Altmann linkages. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(4), 495-503. doi: 10.2495/CMEM-V5-N4-495-503 (in English)
11. Belfiore, N. P., & Pennestri, E. (1997). An atlas of linkage-type robotic grippers. *Mechanism and Machine Theory*, 32(7), 811-833. (in English)

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

12. Monkman, G., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2007). *Robot grippers*. Weinheim: WILEY-VCH. doi: 10.1002/9783527610280 (in English)
13. Pfurner, M., Stigger, T., & Husty, M. L. (2017). Algebraic analysis of overconstrained single loop four link mechanisms with revolute and prismatic joints. *Mechanism and Machine Theory*, 114, 11-19. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.014 (in English)
14. Pogrebnyak, R. P. (2015). Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Theory and Practice Steel Industry. 1-2*, 123-125. (in English)
15. Pham, D. T., & Haginbotham, W. B. (Eds.). (1986). *Robot Grippers. (International trends in manufacturing technology)*. Bedford: IFS. (in English)
16. Schlenoff, C., Balakirsky, S. & Christensen, H. (2018). Robust grasp preimages under unknown mass and friction distributions. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 25(2), 99-110. doi: 10.3233/ICA-180568 (in English)

Надійшла до редколегії: 27.04.2018

Прийнята до друку: 31.07.2018

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.867.2

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, С. В. РАКША², Е. В. ТКАЧУК³

^{1*}Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, эл. почта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 634 17 46, эл. почта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

³Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (066) 149 23 49, эл. почта ev13tk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0309-1644

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАРЬИРУЕМЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УРАВНОВЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

Цель. Исследование выполнено с целью совершенствования процесса проектирования уравновешивающего устройства порталного крана. Для ее достижения необходимо: 1) составить динамическую и математическую модели, позволяющие описать движение уравновешивающего устройства и стреловой системы порталного крана при изменении вылета; 2) разработать методику определения массива варьируемых конструктивных параметров уравновешивающих устройств; 3) рассчитать оптимальное соотношение координат крепления коромысла уравновешивающих устройств и изучить их влияние на неуравновешенность стреловой системы порталного крана. **Методика.** Для определения кинематических характеристик звеньев уравновешивающих устройств разработаны динамическая и математическая модели, которые позволяют описать движение противовеса с коромыслом при изменении вылета стрелы. Задача уравновешивания стреловых систем порталных кранов сводится к определению конструктивных параметров устройства, которое обеспечивало бы уравновешивание стреловой системы на всём диапазоне вылетов. Также разработана методика определения приемлемых варьируемых конструктивных параметров уравновешивающих устройств с учётом условий подвижности, собираемости и требований к значениям неуравновешенного стрелового момента. **Результаты.** С помощью математического моделирования научно обоснована целесообразность использования предложенной методики определения конструктивных параметров уравновешивающих устройств. Разработанный массив варьируемых данных позволяет учитывать характер уравновешивания и оптимизировать конструкцию уравновешивающих устройств и стреловых систем порталных кранов. Авторами выполнен анализ влияния варьируемых параметров на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочленённой стреловой системы: неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов. **Научная новизна.** Впервые предложена методика определения массива варьируемых данных, которая позволяет получить рациональные конструктивные параметры уравновешивающих устройств порталных кранов. Разработана локальная программа для комплексного оптимизационного синтеза, позволяющая определять оптимальные соотношения координат коромысла, при которых выполняются условия уравновешенности и качества порталного крана. **Практическая значимость.** Предложенная методика определения массива варьируемых конструктивных параметров может быть использована при проектировании новых и модернизации существующих уравновешивающих устройств порталных кранов с шарнирно-сочленёнными стреловыми системами, что позволит снизить материалоемкость стреловой системы и энергопотребление кранов. С помощью компьютерного моделирования выполнена апробация предложенной методики применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев всех систем.

Ключевые слова: порталный кран; уравновешивающее устройство; шарнирно-сочленённая стреловая система; синтез; конструктивные параметры; коромысло; неуравновешенный момент

Введение

Обеспечение уравнивания шарнирно-сочленённой стреловой системы является важным требованием при проектировании порталного крана.

Существуют различные способы и подходы, позволяющие соблюдать условие уравнивания [1, 5, 6, 8–13, 17–22], однако ни один из них не даёт возможности корректировать и улучшать параметры шарнирно-сочленённой стреловой системы на реальных, введённых в эксплуатацию, порталных кранах.

В реальной конструкции крана возможности варьирования очень ограничены. Изменение некоторых параметров вообще невозможно, так как это потребует дорогостоящей реконструкции крана.

На структурной схеме уравнивающего устройства порталного крана (рис. 1) указаны звенья, значения которых существенно влияют на общую компоновку и материалоемкость крана. К ним относятся: $O_1A = b$ – расстояние от оси качания стрелы до места крепления тяги противовеса, $AB = c$ – длина тяги противовеса, $O_2B = d$ – длина переднего плеча коромысла, $BC = r$ – расстояние от оси качания стрелы до точки крепления противовеса, m – расстояние по горизонтали от оси качания стрелы до оси качания коромысла, l – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до оси качания коромысла, $G_{\text{П}}$ – вес противовеса.

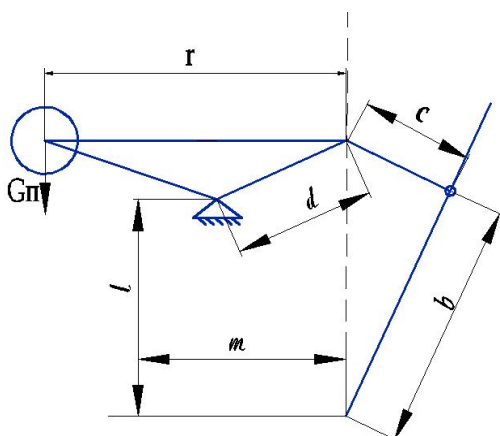


Рис. 1. Структурная схема уравнивающего устройства порталного крана

Fig. 1. Structural diagram of balancing unit of the portal crane

Цель

Основной целью данного исследования является расчёт варьируемых параметров уравнивающих устройств порталных кранов и определение массива конструктивных данных для автоматизированного синтеза. Для достижения цели в исследовании предусмотрено: 1) разработать динамическую и математическую модели, которые описывают движение уравнивающего устройства и стреловой системы при изменении вылета; 2) разработать методику расчёта и определения массива варьируемых конструктивных параметров уравнивающего устройства; 3) рассчитать оптимальное соотношение координат крепления коромысла уравнивающего устройства и изучить их влияние на неуравновешенность стреловой системы порталного крана.

Методика

Для определения кинематических характеристик звеньев уравнивающих устройств разработаны динамическая и математическая модели, которые позволяют описать движение противовеса с коромыслом при изменении вылета стрелы. Задача уравнивания стреловых систем порталных кранов сводится к определению конструктивных параметров устройства, которое обеспечивало бы уравнивание стреловой системы на всём диапазоне вылетов. Также разработана методика определения приемлемых варьируемых конструктивных параметров уравнивающих устройств с учётом условий подвижности, собираемости и требований к значениям неуравновешенного стрелового момента.

Результаты

При теоретических исследованиях уравнивающего устройства и синтеза шарнирно-сочленённой стреловой системы авторами представлены соответствующие динамические модели [15].

1. *Разработка динамических моделей шарнирно-сочленённой стреловой системы и уравнивающего устройства порталного крана.* Динамическая модель шарнирно-сочленённой стреловой системы (рис. 2) харак-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

теризується геометричними і інерційними параметрами [15].

За основу взята стреловая система, грузовой канат в которой проходит параллельно жёсткой оттяжке.

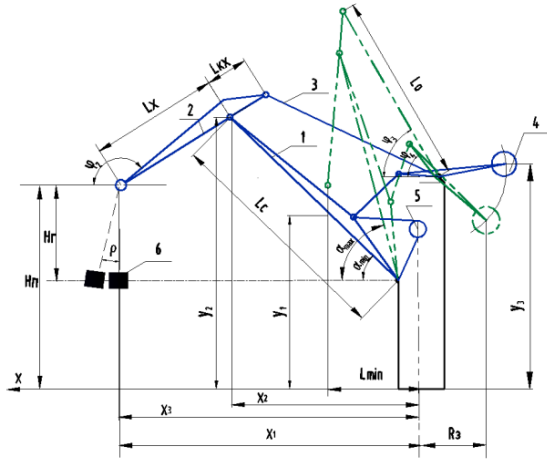


Рис. 2. Динамическая модель шарнирно-сочленённой стреловой системы портального крана:

1 – стрела; 2 – хобот; 3 – оттяжка;
4 – коромысло с противовесом; 5 – привод механизма изменения вылета; 6 – груз

Fig. 2. The dynamic model of articulated boom system of the portal crane:

1 – boom; 2 – horse-head jib; 3 – guy;
4 – counterweighted balance beam; 5 – derricking mechanism drive; 6 – load

Геометрические параметры следующие: L_x – длина хобота, L_{cx} – длина контрхобота, L_c – длина стрелы, L_0 – длина оттяжки, H_{Π} – высота подъёма груза, H_{Γ} – высота подвеса груза, R_3 – величина заднего габарита, α – угловая координата стрелы, ρ – угол отклонения грузового каната от вертикали, y_1 , y_2 , y_3 – вертикальные координаты центров тяжести стрелы, хобота, противовеса, x_1 , x_2 – горизонтальные координаты центров тяжести груза и хобота, x_3 – горизонтальная координата оси блока хобота, φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 – угловые координаты ротора электродвигателя механизма изменения вылета стрелы, хобота, оттяжки и противовеса, L_{\min} – минимальный вылет стрелы, L_{\max} – максимальный вылет стрелы. К инерционным параметрам относят: m_1 , m_2 ,

m_3 , m_4 , m – масса стрелы, хобота в сборе с контрхоботом, оттяжки, противовеса и груза, J , J_1 , J_2 , J_3 , J_4 – моменты инерции относительно собственных осей вращения ротора электродвигателя механизма изменения вылета, стрелы, хобота, оттяжки, противовеса [15].

К параметрам динамической модели уравновешивающего устройства (рис. 3) относят: L_1 – расстояние между противоположными точками противовеса и тяги, L_2 – рабочая часть зубчатой рейки механизма изменения вылета стрелы, a_2 – длина опорной стойки противовеса, a_3 – длина опорной стойки приводного механизма, d – длина тягового плеча противовеса, e – длина кронштейна противовеса, c – длина тяги уравновешивающего устройства, b_1 – длина стрелового плеча механизма уравновешивания, b_2 – длина стрелового плеча приводного механизма, ψ – угол наклона к горизонту опорной стойки противовеса, ξ – угол наклона к горизонту опорной стойки механизма изменения вылета, φ_4 – угловая координата противовеса, ω – угол раскрытия коромысла.

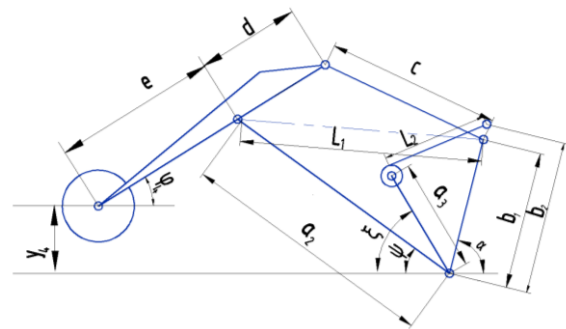


Рис. 3. Динамическая модель уравновешивающего устройства портального крана

Fig. 3. Dynamic model of the balancing unit of the portal crane

2. Разработка математической модели уравновешивающего устройства и стреловой системы портального крана. Исходные данные математической модели, исходя из рекомендаций [2, 6, 7], могут состоять из её кинематической схемы, геометрии масс и характеристик цикла движения.

Изменение положения стрелы приводит к изменению положения других звеньев, кото-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

рые определяются координатами хобота – φ_2 , y_2 ; оттяжки – φ_3 ; противовеса – φ_4 ; груза – x_1 .

Противовес с коромыслом выполняет вращательное движение вокруг своей оси. Это движение можно записать при помощи двух координат:

$$\begin{aligned} \varphi_4 &= \arccos \frac{a_2^2 - b_1^2 + L_1^2}{2a_2 \cdot L_1} + \arccos \frac{d^2 - c^2 + L_1^2}{2d \cdot L_1} - \psi, \\ \dot{\varphi}_4 &= -2 \frac{\dot{L}_1 \frac{(a_2^2 - b_1^2 + L_1^2) \dot{L}_1}{2a_2 \cdot L_1^2}}{\sqrt{4 - \left(\frac{a_2^2 - b_1^2 + L_1^2}{a_2 \cdot L_1} \right)^2}} - 2 \frac{\dot{L}_1 \frac{(d^2 - c^2 + L_1^2) \dot{L}_1}{2d \cdot L_1}}{\sqrt{4 - \left(\frac{d^2 - c^2 + L_1^2}{d \cdot L_1} \right)^2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

Момент противовеса должен полностью уравновесить момент стреловой системы и часть грузового неуравновешенного момента: $M_{II} = M_{HC} + M_Q$.

Достичь полного уравновешивания на всем диапазоне вылетов невозможно, потому что момент стреловой системы и момент противо-

– вертикальной:

$$\begin{aligned} y_4 &= a_2 \cdot \sin \psi - e \cdot \sin(\mu + \varphi_4), \\ \dot{y}_4 &= e \cdot \cos(\mu + \varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\ddot{y}_4 = -e \cdot \sin(\mu + \varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 + e \cdot \cos(\mu + \varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4,$$

– угловой:

веса изменяются в зависимости от угла наклона стрелы при изменении вылета – α .

Наиболее приемлемой показала себя усовершенствованная математическая модель уравновешенной шарнирно-сочлененной стреловой системы (3), которая учитывает невозможность полного уравновешивания и наличие неуравновешенного стрелового момента:

$$\begin{cases} J_{cc} \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{cc}}{\partial \alpha} \dot{\alpha}^2 = M \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} + mg \frac{x_1 - x_3}{H_\Gamma} \frac{\partial x_3}{\partial \alpha} + G_{II} e \cos(\mu + \varphi_4) \\ -G_C (L_c \cos \alpha - L_x \cos \varphi_2) \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}; \\ m \ddot{x}_1 = -mg \frac{x_1 - x_3}{H_\Gamma}. \end{cases} \quad (3)$$

3. Методика определения массива варьируемых конструктивных параметров уравновешивающего устройства. Задача уравновешивания стреловых систем порталных кранов сводится к определению конструктивных параметров уравновешивающего устройства, которое обеспечивало бы уравновешивание стреловой системы на всём диапазоне вылетов.

Неуравновешенный момент на максимальном вылете должен действовать в сторону уменьшения, на минимальном вылете – в сторону увеличения грузового момента, а на промежуточных вылетах иметь одну или несколько точек устойчивого равновесия стреловой си-

стемы, к которым она будет стремиться в случае отказа механизма (рис. 4) [5, 8, 14–16].

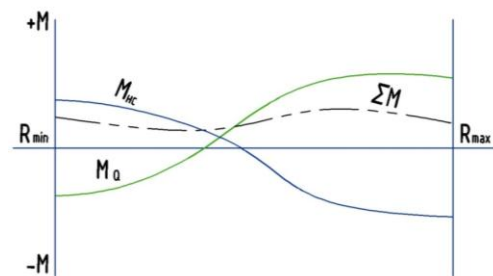


Рис. 4. Графики моментов $M_{HC}, M_Q, \sum M$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Для обеспечения условий уравновешенности стреловой системы порталного крана необходимо определить конструктивные параметры уравновешивающего устройства, значения которых существенно влияют на общую компоновку и материалоемкость крана. Выделенные на рис. 1 параметры звеньев (l, m, d, c) позволяют выполнить рациональный автоматизированный синтез за счёт варьирования их значений.

$$M_{\Pi} = G_{\Pi} \left(\frac{r}{m} + \cos(\lambda + \omega) \right) + y_c + r \cdot \frac{l}{m} \cdot \frac{x_B y_A - x_A y_B}{c(m+l) + x_B y_A - x_A y_B}, \quad (4)$$

где r – расстояние от оси качания стрелы до точки крепления противовеса, ω – угол раскрытия коромысла, y_c – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до точки крепления противовеса.

$$y_c = l + d \cdot \sin(\omega + \theta),$$

$$\theta = \arcsin \frac{y_B - l}{d}, \quad (5)$$

В результате экспериментальных исследований порталных кранов установлено, что оптимальные значения веса противовеса, грузового и неуравновешенного моментов достигаются с использованием автоматизированного синтеза при варьировании параметров уравновешивающего устройства из определенного массива: $d = 3,1 \dots 3,6$ м; $c = 8,1 \dots 9,0$ м; $l = 11,85 \dots 13$ м; $m = 4,54 \dots 5,83$ м.

На основе обработанных статистических данных изученных порталных кранов получены значения координат крепления коромысла уравновешивающего устройства и рассмотрена их взаимосвязь с неуравновешенным моментом: $M_{HC} = f(l)$; $M_{HC} = f(m)$.

Экспериментально установленные значения параметров l и m в зависимости от неуравновешенного момента описываются разными аналитическими зависимостями, определение которых выполнено методом аппроксимации. Поиск аппроксимирующих функций, максимально приближенных к экспериментальным данным, осуществлён посредством программы MS Excel методом наименьших квадратов. Используя данный метод, функции $M_{HC} = f(l)$; $M_{HC} = f(m)$ были аппроксимиро-

В процессе исследования установлено, что наибольшее влияние на качество уравновешивания оказывают координаты крепления коромысла уравновешивающего устройства: вертикальная l и горизонтальная m .

Момент противовеса M_{Π} зависит от соотношения $\frac{l}{m}$, веса противовеса G_{Π} , координат переднего плеча коромысла ($x_B; y_B$), ($x_A; y_A$):

ваны следующими зависимостями: многочленом первой степени – $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot l$; $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot m$, многочленом второй степени – $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot l + a_3 \cdot l^2$; $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot m + a_3 \cdot m^2$, экспоненциальной зависимостью – $M_{HC} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot l}$; $M_{HC} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot m}$.

Результаты расчётов представлены в табл. 1. Для определения функции, которая наилучшим образом описывает зависимость между параметрами M_{HC} и l , M_{HC} и m , для каждого вида аппроксимации вычислены коэффициенты детерминации и коэффициент корреляции (табл. 2).

Таблица 1

Результаты аппроксимации функций

$$M_{HC} = f(l); M_{HC} = f(m).$$

Table 1

Results of functions approximation

$$M_{HC} = f(l); M_{HC} = f(m).$$

Вид аппроксимации	Координаты крепления	
	l	m
Линейная	$M_{HC} = -2645,5 + 224,1 \cdot l$	$M_{HC} = -803,58 + 206,88 \cdot m$
Квадратичная	$M_{HC} = 3412 - 741,4 \cdot l + 39,26 \cdot l^2$	$M_{HC} = -3628,5 + 1309,9 \cdot m + 106,8 \cdot m^2$
Экспоненциальная	$M_{HC} = 1,98 \cdot e^{0,93 \cdot l}$	$M_{HC} = 1,53 \cdot e^{0,92 \cdot m}$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции и детерминации

Table 2

Values of correlation and determination coefficients

Коэффициент корреляции	<i>l</i>	<i>m</i>
		0,96
Коэффициент детерминации для линейной аппроксимации	0,92	0,86
Коэффициент детерминации для квадратичной аппроксимации	0,89	0,89
Коэффициент детерминации для экспоненциальной аппроксимации	0,8	0,76

Согласно рекомендациям, содержащимся в работах [2–4], эмпирическая функция наиболее точно отражает экспериментальные данные, если коэффициент детерминации приближенно равен коэффициенту корреляции.

В результате исследований установлено, что зависимость $M_{HC} = f(l)$ наилучшим образом описывается линейной функцией $M_{HC} = -2645,5 + 234l$; а зависимость $M_{HC} = f(m)$ – квадратичной функцией $M_{HC} = -3628,5 + 1309,9 \cdot m + 106,8 \cdot m^2$. Построены графики (рис. 5–7), которые отражают характер изменения неуравновешенного момента при варьировании значений координат (*m*, *l*).

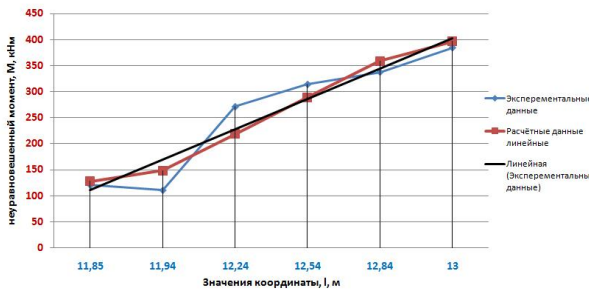


Рис. 5. График линейной зависимости $M_{HC} = f(l)$

Fig. 5. Graph of linear dependence $M_{HC} = f(l)$

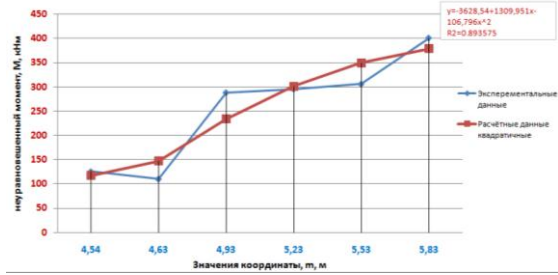


Рис. 6. График квадратичной зависимости $M_{HC} = f(m)$

Fig. 6. Graph of quadratic dependence $M_{HC} = f(m)$

Зависимость неуравновешенного момента от координат крепления коромысла m и l

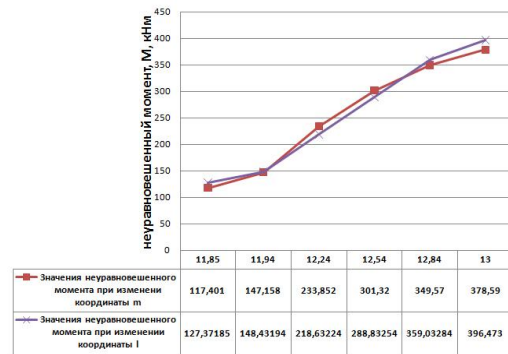


Рис. 7. График зависимости неуравновешенного момента от координат крепления коромысла уравновешивающего устройства $M_{HC} = f(m, l)$

Fig. 7. The graph of the dependence of the unbalanced moment on the coordinates of the mounting of the beam of the balancing device $M_{HC} = f(m, l)$

Результаты исследования отражены в работе [15]:

1. Оптимальные значения названных критериев качества достигаются при $m = 4,63...5,425$ м, $l = 11,94...12,72$ м.

2. Значения параметров изменить относительно оптимальных значений *m* и *l* возможно не более, чем на 0,1 м. Дальнейшее изменение недопустимо по ограничениям угла захода противовеса и обеспечения компоновки стреловой системы и системы уравновешивания.

3. На качество уравновешивания системы в наибольшей степени влияет параметр *l*.

4. Характер изменения неуравновешенного момента в оптимизированном варианте ($\frac{l}{m} = 2,35...2,58$ м) полностью отвечает всем требованиям к системе уравновешивания.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

5. При уменьшении или увеличении параметров m и l процент неуравновешенности увеличивается, а неуравновешенный момент принимает нежелательную направленность.

4. *Экспериментальное исследование адекватности предложенной методики на компьютерных моделях порталных кранов.* Автора-

ми апробирован представленный метод определения массива варьируемых конструктивных параметров уравнивающих устройств применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев стреловой системы и уравнивающего устройства (табл. 3).

Таблица 3

Анализ варьируемых параметров уравнивающего устройства

Table 3

Analysis of variable parameters of the balancing unit

Результаты исследования	Модели порталных кранов		
	КПП 16-36-10,5	КПП 32-32-10,5	КПП 40-34-10,5
$d = 3,1...3,6$ м; $c = 8,1...9,0$ м; $l = 11,94...12,72$ м; $m = 4,63...5,42$ м.	$d = 3,18$ м; $c = 8,2$ м; $l = 11,94$ м; $m = 4,63$ м.	$d = 3,5$ м; $c = 8$ м; $l = 12,1$ м; $m = 4,72$ м.	$d = 3,27$ м; $c = 8,42$ м; $l = 12,6$ м; $m = 5,2$ м.

Таблица 4

С помощью метода определения массива варьируемых параметров уравнивающих устройств порталных кранов проанализировано качество уравниваемости до и после использования представленной методики и автоматизированного синтеза (табл. 4).

Анализ показал целесообразность использования представленной методики и рекомендаций в комплексном оптимизационном синтезе [16] шарнирно-сочленённых стреловых систем порталных кранов.

На основании математических расчётов и компьютерного моделирования научно обоснована целесообразность использования предложенной методики определения конструктивных параметров уравнивающих устройств. Разработанный массив варьируемых данных позволяет учитывать характер уравнивания и оптимизировать конструкцию уравнивающих устройств и стреловых систем порталных кранов.

Анализ показателей уравниваемости стреловой системы порталных кранов

Table 4

Indicator analysis of the boom system balance for portal cranes

Показатели уравниваемости	КПП 16-36-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Масса противовеса	15,7 т	11,09 т
Неуравновешенность	14,5 %	2 %
Неуравновешенный момент	776,24 кН·м	110,64 кН·м
Показатели уравниваемости	КПП 32-32-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Масса противовеса	23,5 т	20,1 т

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Продолжение таблицы 4
Continuation of a table 4

Показатели уравновешенности	КПП 16-36-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Неуравновешенность	7 %	2 %
Неуравновешенный момент	637,29 кН·м	446,1 кН·м
Показатели уравновешенности	КПП 40-34-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Масса противовеса	26,7 т	23,5 т
Неуравновешенность	26 %	5 %
Неуравновешенный момент	133,02 кН·м	105,65 кН·м

Научная новизна и практическая значимость

Впервые представлена методика определения массива варьируемых данных, которая позволяет сформировать массив рациональных параметров уравнивающих устройств. Разработана локальная программа для ком-

плексного оптимизационного синтеза, позволяющая определять оптимальные соотношения координат коромысла, при котором выполняются условия уравновешенности и качества порталного крана.

Представленная методика расчёта и определения массива варьируемых конструктивных параметров может быть внедрена в практику проектно-конструкторских организаций для разработок, проектирования новых и модернизации существующих уравнивающих устройств порталных кранов с шарнирно-сочленёнными стреловыми системами.

Выводы

В статье рассмотрен метод определения варьируемых данных для комплексного оптимизационного синтеза уравнивающих устройств. Разработки выполнены на базе программы MS Excel.

Авторами выполнен анализ влияния варьируемых параметров на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочленённой стреловой системы: неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов.

Предложенная методика апробирована при запуске комплексного оптимизационного синтеза применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев всех систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации : в 2 кн. / Ф. П. Васильев. – Москва : МЦНМО, 2011.
2. Верховод, В. П. Использование программы MathCAD при синтезе передаточных рычажных механизмов [Электронный ресурс] / В. П. Верховод // Теория механизмов и машин. – 2011. – № 1 (17), т. 9. – С. 69–76. – Режим доступа: http://tmm.spbstu.ru/17/verkhovod_17.pdf – Загл. с экрана. – Проверено : 21.06.2018.
3. Воевода, А. А. Реализация итерационного метода наименьших квадратов для оценивания параметров статических объектов в среде MathLab / А. А. Воевода, Г. В. Трошина // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 28–36. doi: 10.24143/2072-9502-2017-1-28-36
4. Лепшени, И. Оптимальный синтез устройства для уравнивания стреловых систем порталных кранов / И. Лепшени, Л. Г. Серлин // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. – Ленинград, 1975. – № 347 : Металлические конструкции кранов. Исследование конвейеров. – С. 77–84.
5. Ловейкин, В. С. Исследование движущих сил в механизме изменения вылета стреловой системы крана / В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2014. – № 84. – С. 39–45.
6. Ловейкін, В. С. Режимно-параметрична оптимізація технічних систем / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2017. – № 19. – С. 90–95.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

7. Мисюра, В. П. Исследование и оптимальное проектирование уравновешивающих устройств стреловых систем порталных кранов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Мисюра Василий Петрович ; Укр. заочн. политехн. ин-т. – Харьков, 1980. – 24 с.
8. Мисюра, В. П. Оптимальное проектирование уравновешивающих устройств стреловых систем порталных кранов / В. П. Мисюра, Б. И. Жермунский // Вестник машиностроения. – 1980. – № 7. – С. 41–43.
9. Моделирование динамического нагружения датчика ограничителя грузового момента в шарнирно-сочленённых стреловых системах порталных кранов с прямолинейным хоботом / И. В. Бурданов, Д. В. Попов, А. Н. Кривонос, В. П. Самусько // Современные пути развития науки и образования : материалы науч.-практ. конф. (Смоленск, 31 июля 2015 г.). – Смоленск, 2015. – С. 126–129.
10. Нестеров, А. А. Технология локальной разгрузки корневых шарниров стреловых систем порталных кранов / А. А. Нестеров // Підйомно-транспортна техніка. – 2016. – № 4 (52). – С. 64–71.
11. Паламарчук, Д. А. Оптимізація режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана з горизонтальним переміщенням вантажу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Паламарчук Дмитро Анатолійович ; Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури. – Київ, 2013. – 25 с.
12. Петухов, П. З. Специальные краны / П. З. Петухов, Г. П. Ксюнин, Л. Г. Серлин. – Москва : Машиностроение, 1985. – 248 с.
13. Справочник по кранам : в 2 т. / под общ. ред. М. М. Гохберга. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – Т. 2. – 559 с.
14. Суглобов, В. В. Определение конструктивных параметров шарнирно-сочленённых стреловых систем порталных кранов / В. В. Суглобов, Е. В. Ткачук // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 156–166. doi: 10.15802/stp2017/92618
15. Суглобов, В. В. Оптимізація конструкції стрілових систем і пристроїв врівноваження порталних кранів / В. В. Суглобов, В. А. Міхеєв, К. В. Ткачук // Университетская наука – 2014 : в 5 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 20–21 мая 2014 г.). – Мариуполь, 2014. – Т. 3. – С. 67–68.
16. Ткачук, К. В. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем порталних кранів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Ткачук Катерина Володимирівна ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2017. – 23 с.
17. Clarke, F. Functional Analysis, Calculus of Variations and Optimal Control / F. Clarke. – London : Springer, 2013. – 591 p. doi: 10.1007/978-1-4471-4820-3
18. Keçin, L. Inverse Design of a New Double-link Luffing Mechanism and Realization on MATLAB / L. Keçin, J. Cuxiang // Proc. of the 3rd ICMEM Intern. Conf. on Mechanical Engineering and Mechanics (21.10–23.10.2009). – Beijing, China, 2009. – P. 301–304.
19. Kolonic, F. Tensor Product Model Transformation-based Controller Design for Gantry Crane Control System – An Application Approach / F. Kolonic, A. Poljagan, I. Petrovic // Acta Polytechnica Hungarica. – 2006. – Vol. 3, No. 4. – P. 95–112.
20. Mauri, K. Intelligent container positioning helps [Электронный ресурс] / K. Mauri // Konecranes Magazine. – 2012. – № 1. – P. 22–27. – Режим доступа: <http://www.konecranes.com/sites/default/files/download/sagt.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 21.06.2018.
21. Seeler, K. A. System dynamics: an introduction for mechanical engineers / K. A. Seeler. – New York : Springer, 2014. – 667 p. doi: 10.1007/978-1-4614-9152-1
22. Vulfson, I. Dynamics of cyclic machines / I. Vulfson. – Cham : Springer Publ., 2015. – 390 p. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, С. В. РАКША², К. В. ТКАЧУК³

^{1*}Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, ел. пошта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 634 17 46, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

³Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, тел. +38 (066) 149 23 49, ел. пошта ev13tk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0309-1644

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

ВИЗНАЧЕННЯ ВАРІЙОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗРІВНОВАЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Мета. Дослідження виконане з метою вдосконалення процесу проектування зрівноважувального пристрою порталного крана. Для її досягнення необхідно: 1) скласти динамічну й математичну моделі, які дозволяють описати рух зрівноважувального пристрою та стрілової системи порталного крана в разі зміни вильоту; 2) запропонувати засіб визначення та методика розрахунку масиву варійовних параметрів конструкції зрівноважувальних пристроїв; 3) розрахувати оптимальне співвідношення координат кріплення коромисла зрівноважувального пристрою та вивчити їх вплив на неврівноваженість стрілової системи порталного крана. **Методика.** Для визначення кінематичних характеристик ланок зрівноважувального пристрою розроблені динамічна й математична моделі, які дозволяють описати рух противаги з коромислом за умови зміни вильоту стріли. Задача врівноваження стрілових систем порталних кранів зводиться до визначення конструктивних параметрів зрівноважувального пристрою, який забезпечував би врівноваження стрілової системи на всьому діапазоні вильотів. Також розроблена методика визначення прийнятних варійовних конструктивних параметрів зрівноважувальних пристроїв із урахуванням умов рухомості, збираності та вимог до значень неврівноваженого стрілового моменту. **Результати.** За допомогою математичного моделювання науково обґрунтована доцільність використання запропонованої методики визначення конструктивних параметрів зрівноважувальних пристроїв. Розроблений масив варійовних даних дозволяє враховувати характер врівноваження й оптимізувати конструкцію зрівноважувальних пристроїв стрілових систем порталних кранів. Авторами проведений аналіз впливу варійовних параметрів на загальноприйняті критерії оцінки якості шарнірно-зчленованої стрілової системи: неврівноваженість системи, вага противаги, показники вантажного й стрілового неврівноважених моментів. **Наукова новизна.** Уперше запропонована методика визначення масиву варійовних даних, яка дозволяє отримати раціональні конструктивні параметри зрівноважувальних пристроїв порталних кранів. Розроблена локальна програма для комплексного оптимізаційного синтезу, що дозволяє визначати оптимальні співвідношення координат коромисла, за яких виконуються умови врівноваженості та якості порталного крана. **Практична значимість.** Запропонована методика визначення масиву варійовних конструктивних параметрів може бути використана під час проектування нових і модернізації наявних зрівноважувальних пристроїв порталних кранів із шарнірно-зчленованими стріловими системами, що дозволить знизити матеріалоемність стрілової системи й енергоспоживання кранів. За допомогою комп'ютерного моделювання виконана апробація запропонованої методики стосовно кранів, компонування яких забезпечує збираність і рухомість ланок усіх систем.

Ключові слова: порталний кран; зрівноважувальний пристрій; шарнірно-зчленована стрілова система; синтез; конструктивні параметри; коромисло; неврівноважений момент

V. V. SUGLOBOV^{1*}, S. V. RAKSHA², K. V. TKACHUK³

^{1*}Dep. «Handling Equipment and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 623 12 69, e-mail suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 634 17 46, e-mail raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

³«Handling Equipment and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (066) 149 23 49, e-mail ev13tk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0309-1644

DETERMINATION OF THE VARIED CONSTRUCTIVE PARAMETERS FOR BALANCING UNITS OF PORTAL CRANES

Purpose. The research was carried out to improve the design process of the balancing unit for portal crane. In order to achieve the purpose one should: 1) to develop a dynamic and mathematical model that allows describing the movement of balancing unit and the boom system of portal crane, when derricking; 2) to propose the way for determining and the methodology for calculating the array of variable design parameters of balancing units; 3) to calculate the optimal ratio of the beam mounting coordinates for balancing units and to study their influence on the imbalance of the portal crane boom system. **Methodology.** To determine the kinematic characteristics of the balancing unit links, dynamic and mathematical models, describing the movement of balance beam with counterweight when

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

derricking, have been developed. The task of balancing boom systems of portal cranes is reduced to determining the design parameters of the device, which would provide balancing of the boom system on the entire range of derricking. It was also developed a methodology for calculating the acceptable varying design parameters of balancing units, taking into account the conditions of mobility, assemblability and the requirements for the values of unbalanced boom torque. **Findings.** Based on mathematical calculations and computer simulation the expediency of using the proposed methodology for determining the design parameters of balancing units has been scientifically substantiated. The developed array of variable data makes it possible to take into account the nature of balancing and optimize the design of counterbalancing devices and boom systems for portal cranes. The authors analyzed the influence of variable parameters on the generally accepted criteria for assessing the quality of the articulated boom system: the system's unbalance, the weight of counterweight, the indices of load and boom unbalanced moments. **Originality.** For the first time, a methodology for determining an array of variable data has been proposed. It makes it possible to form the array of rational design parameters of balancing units. It was developed a local program for complex optimization synthesis, which makes it possible to determine the optimum ratios of the balance beam coordinates, under which the conditions of balance and quality of the portal crane are satisfied. **Practical value.** The proposed methodology for determining the array of varying design parameters can be used in the development organizations for designing new and retrofitting the existing balancing units for portal cranes with articulated boom systems. The proposed methodology was tested at the launch of complex optimization synthesis with respect to cranes, the configuration of which ensures assemblability and mobility of the links of all systems.

Keywords: portal crane; balancing units; articulated boom system; synthesis; design parameters; balance beam; unbalanced moment

REFERENCES

1. Vasilev, F. P. (2011). *Metody optimizatsii* (Vol. 1-2). Moscow: MCNMO. (in Russian)
2. Verkhovod, V. P. (2011). Ispolzovanie programmy MathCAD pri sinteze peredatochnykh rychazhnykh mekhanizmov. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 1(9), 69-76. Retrieved from http://tmm.spbstu.ru/17/verkhovod_17.pdf (in Russian)
3. Voevoda, A. A., & Troshina, G. V. (2017). The realization of the iterative method of the least squares for the estimation of static object parameters in Matlab environment. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Sciences and Informatics*, 1, 28-36. doi: 10.24143/2072-9502-2017-1-28-36 (in Russian)
4. Lepsheni, I., & Serlin, L. G. (1975). Optimalnyy sintez ustroystva dlya uravnoveshivaniya strelovykh sistem portalnykh kranov. *Trudy Leningradskogo politekhnicheskogo instituta: Metallicheskie konstruksii kranov. Issledovanie konveyerov*, 347, 77-84. (in Russian)
5. Loveykin, V. S., & Palamarchuk, D. A. (2014). The driving forces research in mechanism luffing of boom system. *Mining, Construction, Road and Reclamation Machines*, 84, 39-45. (in Russian)
6. Loveikin, V. S., & Romasevych, Y. O. (2017). Rezhymno-parametrychna optymizatsiia tekhnichnykh system. *Mashynobuduvannia*, 19, 90-95. (in Ukrainian)
7. Misyura, V. P. (1980). *Issledovanie i optimalnoe proektirovanie uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem portalnykh kranov*. (Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk). Ukrainskiy zaochnyy politekhnicheskyy institute, Kharkov. (in Russian)
8. Misyura, V. P., & Zhermunskiy, B. I. (1980). Optimalnoe proektirovanie uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem por-talnykh kranov. *Vestnik mashinostroeniya*, 7, 41-43. (in Russian)
9. Burdanov, I. V., Popov, D. V., Krivonos, A. N., & Samusko, V. P. (2015). Modelirovanie dinamicheskogo nagruzheniya datchika ogranichitelya gruzovogo momenta v sharnirno-sochlenennykh strelovykh sistemakh portalnykh kranov s pryamolineynym khobotom. *Sovremennye puti razvitiya nauki i obrazovaniya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Smolensk, July 31, 2015)* Smolensk, 126-129. (in Russian)
10. Nesterov, A. A. (2016). Tekhnologiya lokalnoy razgruzki kornevykh sharnirov strelovykh sistem portalnykh kranov. *Hebezeuge und Fördermittel*, 4(52), 64-71. Retrieved from <http://ptt-journals.net/wp-content/uploads/2016/12/Pidtt-2016-4-9.pdf> (in Russian)
11. Palamarchuk, D. A. (2013). *Optymizatsiia rezhymiv rukhu sharnirno-zhchenovanoi strilovoi systemy krana z horyzon-talnym peremishchenniam vantazhu*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury, Kyiv. (in Ukrainian)
12. Petukhov, P. Z., Ksyunin, G. P., & Serlin, L. G. (1985). *Spetsialnye krany*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
13. Gokhberg, M. M. (Ed). (1988). *Spravochnik po kranam* (Vol. 1-2). Leningrad: Mashinostroenie. (in Russian)

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

14. Suglobov, V. V., & Tkachuk, K. V. (2017). Determination of design parameters determination of design parameters of articulated jib systems of portal crane. *Science and Transport Progress*, 1(67), 156-166. doi: 10.15802/stp2017/92618 (in Russian)
15. Suhlobov, V. V., Mikhieiev, V. A., & Tkachuk, K. V. (2014). Optymizatsiia konstruksii strilovykh system i prystroiv vrvnovazhennia portalnykh kraniv. *Universitetskaya nauka (Vol. 1-5): tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Mariupol, 20–21 May 2014) Mariupol*, 67-68. (in Ukrainian)
16. Tkachuk, K. V. (2017). *Obruntuvannia ratsionalnykh konstruktivnykh parametriv sharnirno-zchlenovanykh strilovykh system portalnykh kraniv*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Ukrainian engineering pedagogics academy, Kharkiv. (in Ukrainian)
17. Clarke, F. (2013). *Functional Analysis, Calculus of Variations and Optimal Control*. New York: Springer Publisher. doi: 10.1007/978-1-4471-4820-3 (in English)
18. Keqin, L., & Cuxiang J. (2009). Inverse Design of a New Double-link Luffing Mechanism and Realization on MATLAB. *Proceedings of the 3rd ICMEM International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics (October 21-23, 2009) Beijing, P. R. China*, 301-304. (in English)
19. Kolonic, F., Poljugan, A., & Petrovic, I. (2006). Tensor Product Model Transformation-based Controller Design for Gantry Crane Control System – An Application Approach. *Acta Polytechnica Hungarica*, 3, 4, 95-112. (in English)
20. Mauri, K., (2012). Intelligent container posirioning helps. *Konecranes Magazine*, 1, 22-27. Retrieved from <http://www.konecranes.com/sites/default/files/download/sagt.pdf> (in English)
21. Seeler, K. A. (2014). *System dynamics: an introduction for mechanical engineers*. New York: Springer Publisher. doi: 10.1007/978-1-4614-9152-1 (in English)
22. Vulfson, I. (2015). *Dynamics of cyclic machines*. Cham: Springer Publisher. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0 (in English)

Поступила в редколлегию: 10.04.2018

Принята к печати: 20.07.2018

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 621.436:526

В. Л. ГОРОБЕЦЬ¹, В. В. КОВАЛЕНКО^{2*}

¹Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 08, ел. пошта vgor5650@gmail.com, ORCID 0000-0002-6537-7461

^{2*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПЕРЕДЧАСНОГО РУЙНУВАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА ТЕПЛОВОЗА 2ТЕ116

Мета. Робота спрямована на виявлення причин передчасного руйнування колінчастого вала дизеля тепловоза 2ТЕ116. **Методика.** Застосовані макроструктурний, фрактографічний, аналітичний аналізи. Вони дозволили виявити причини передчасного руйнування вала. **Результати.** У цій роботі предметом дослідження є не тільки структурний стан та властивості матеріалу вала, а й хімічні властивості навколишнього середовища, робочої рідини та стан робочої документації з експлуатації означеного тепловоза. Проведені дослідження показали: 1) невідповідність ударної в'язкості матеріалу колінчастого вала вимогам відповідного стандарту; 2) наявність у хімічному складі мастила більше ніж на 17 % дизельного палива, що значно підвищує коефіцієнт тертя в робочому механізмі за рахунок утворення нагару, ділянок зчеплень та пітингової корозії металу; 3) вирвані сторінки робочого журналу доводять, що експлуатаційні служби намагалися приховати неналежне використання та догляд за робочими механізмами дизеля тепловоза 2ТЕ116. **Наукова новизна.** У роботі застосовано комплексний аналітичний і технічний підхід до виявлення причин передчасного руйнування колінчастого вала тепловоза 2ТЕ116. Оцінено максимальну кількість факторів, які могли вплинути на передчасне руйнування колінчастого вала. Показано, що сукупність факторів, які негативно вплинули на експлуатаційні характеристики колінчастого вала, досягла так званої «критичної маси», що неминуче викликало руйнування. Упровадження додаткових факторів сигналізації (окрім шумового фактора у процесі роботи дизеля з мастилом, засміченим більш ніж на 17 % дизельним паливом) та контролю несправностей у роботі подібних великих механічних агрегатів дозволить додатково дисциплінувати машиністів і слюсарів під час виконання інструкцій для попередження руйнування конструкцій локомотивів. **Практична значимість.** Дослідження підтвердили важливість контролю за хімічним складом і механічними характеристиками відповідальних деталей і конструкцій рухомого складу. Доведено необхідність періодичного контролю хімічного складу мастила. Нагляд за акуратним веденням робочого журналу може попередити руйнування конструкцій рухомого складу, які мають високу вартість.

Ключові слова: дизель; тепловоз 2ТЕ116; мастило; передчасне руйнування; колінчастий вал; механічні характеристики

Вступ

Для проведення досліджень імовірної причини зламу колінчастого вала дизеля Д49 тепловоза 2ТЕ116, на підставі металографічної експертизи зразків вала колінчастого Д49, фрактографічної оцінки зламу, аналізу хімічного складу матеріалу, досліджень відпрацьованого

масла та механічних випробувань металу, наданих ПрАТ «Дніпропетровський тепловозоремонтний завод», використано теоретичні оцінки результатів випробувань, технічні відмітки в робочому журналі експлуатації тепловоза 2ТЕ116, розроблено рекомендації з подальшої експлуатації колінчастих валів дизельних двигунів Д49.

Мета

Робота спрямована на виявлення причин передчасного руйнування колінчастого вала дизеля Д49, якості матеріалу та умов експлуатації.

Об'єктом дослідження є вал № 01-354 дизеля типу Д49, виготовлений 30.05.91, і встановлений на локомотив 2ТЕ116 № 969, фотокопії сторінок робочого журналу тепловоза 2ТЕ116, звіт, наданий ПрАТ «ДТРЗ», про металографічні та механічні випробування металу шийки зламаного колінчастого вала, хімічний аналіз мастила М–14Г2. Пробіг тепловоза з цим валом після капітального ремонту склав 56 735 км (лист ПрАТ «ДТРЗ» від 24.04.2017, вих. № 15–01/221).

Методика

У роботі застосовано макроскопічні, фрактографічні методи дослідження структури злому, аналітичні дослідження робочої документації, хімічні дослідження складу мастила дизеля.

Результати

Колінчастий вал належить до числа найбільш напружених і дорогих деталей двигуна. Його вартість складає 30 % від вартості всього двигуна.

У процесі роботи двигуна колінчастий вал навантажується силами тиску газів, а також силами інерції деталей, що рухаються зворотно-поступально та обертаються. Ці сили викликають значні напруження кручення, вигину й обертальні коливання, внаслідок чого шийки вала зазнають змінного навантаження, яке викликає значну роботу тертя і знос шийок. Тому колінчастий вал повинен мати високу міцність, жорсткість і зносостійкість поверхонь, які труться при відносно невеликій масі, що складає не більше 15 % маси двигуна. Колінчастий вал може бути виготовлений з якісної легованої сталі куванням або штампуванням, а також литтям.

Колінчастий вал тепловозного дизеля типу Д49 має 10 кореневих і 8 шатунних шийок, що розташовані під кутом 90° одна до одної. Між 9-ю і 10-ю кореневими шийками встановлюється шестерня приводу газорозподільного механізму дизеля. До щік вала за допомогою шпильок і гайок кріпляться противаги. Отвори корене-

вих шийок з'єднані каналами з шатунними шийками, по яких подається мастило. Дев'ята коренева шийка має упорні бурти, що захищають колінчастий вал від переміщення. Від температурних навантажень колінчастий вал може видовжуватися від 9-ї кореневої шийки до першої. Фланець відбору міцності з'єднується пластинчастою муфтою з тяговим генератором; до фланця з протилежної сторони кріпиться комбінований антивібратор.

В умовах експлуатації високі знако-змінні навантаження від вигину й обертальних коливань можуть призвести до руйнування вала. Цьому також сприяють дефекти, які часто виникають під час виготовлення вала (литтям або в процесі механічної обробки). Підвищені механічні напруження вала можуть з'являтися в результаті порушення його врівноваженості, а також у разі неправильного регулювання антивібратора або зносу його вантажів і пальців. Стирання шийки вала може виникнути внаслідок погіршення подачі на її поверхню мастила, його розрідження через потрапляння в нього дизельного палива (у нашому випадку близько 17 % від об'єму мастила). У разі неправильної укладки вала в постелі блока або неправильного його центрування з валом тягового генератора виникає пружний вигин вала. У результаті неправильного шліфування корневих шийок під час ремонту, а також від дії напружень може виникнути залишковий вигин.

Основними несправностями колінчастих валів є: наднормативне зношування шийок; тріщини і злами; викришування, корозія і знос бабітової заливки вкладишів; зношування вкладишів і втрата торцевого натягу; тріщини кришок корневих підшипників [1–2, 4–7, 10–11, 13, 14].

Виготовлення поковок із легової сталі для валів дизельних двигунів за державними стандартами вимагає контролю якості і механічних характеристик заготовок і готових виробів на всіх стадіях виробництва:

- контроль металургійної якості поковок для виробництва валів;
- контроль макро- та мікроструктури металу;
- контроль механічних властивостей металу готового продукту на відповідність нормативним документам [3, 8, 9].

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

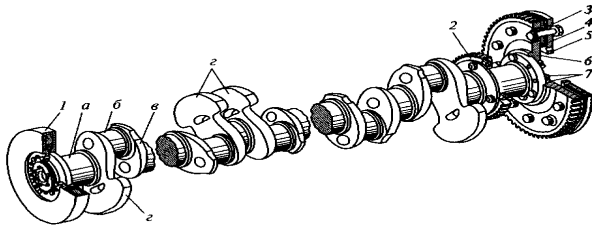


Рис. 1. Колінчастий вал дизеля 1А-5Д49:
1 – антивібратор; 2 – шестерня; 3 – сухар;
4 – пакет пластин; 5, 6 – диски дизель-генераторної муфти; 7 – напрямні кільця; а – корінна шийка; б – шатунна шийка; в – щічка; г – противаги

Fig. 1. The crankshaft of diesel 1A-5D49: 1 – impulse neutralizer; 2 – gear; 3 – collet; 4 – wafer pack; 5, 6 – diesel-generator coupling disks; 7 – guiding rings; a – main journal; b – crank pin; c – cheek; g – counterweights

Загальний вигляд дизеля Д49 представлено на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд дизеля Д49

Fig. 2. General view of diesel D49

Результати визначення хімічного складу матеріалу вала і хімічний склад сталі DIN 30CrMoV9, наданий ПрАТ «ДТРЗ», що нормується за стандартами Євросоюзу, наведені в табл. 1.

Результати випробувань механічних властивостей матеріалу, проведених в ЦЗЛ (центральної заводській лабораторії), акредитованій лабораторії ДП «Завод ім. В. О. Малишева» м. Харків, і механічні властивості сталі DIN 30CrMoV9 відповідно до вимог стандарту Євросоюзу, наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Table 1

Хімічний склад колінчастого вала фактичний та за вимогами стандартів
Chemical composition of the crankshaft, the actual one and according to the requirements of the standards

Вміст елементів % масовий									
Зразки	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	V
експериментальний зразок	0,34	0,46	0,37	2,60	0,38	0,015	0,013	0,19	0,12
DIN EN 10083-2 (2006), DIN17200(1987)	0,26 – 0,34	0,40 – 0,70	≤ 0,40	2,30 – 2,70	≤ 0,60	≤ 0,035	≤ 0,035	0,15 – 0,25	0,10 – 0,20

Таблиця 2

Table 2

Механічні характеристики сталі колінчастого вала фактичні та за вимогами стандартів

The mechanical characteristics of the crankshaft steel, the actual ones and according to the requirements of the standards

Умовн. № зраз.	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	φ , %	KCU, кгс·м/с ² м ²
01	764,4	627,2	20,0	64,0	16,9
02	774,2	637,0	20,0	64,0	16,0
DIN EN 10083-2 (2006), DIN17200(1987) Ø17 – 40 мм	980 – 1180	785	≥ 11	≥ 45	≥ 41,0

Твердість матеріалу вала, що зазнав за нормативною технічною документацією такої термічної обробки: відпалювання за температури 680–720 °С, нормалізацію за температури 880–920 °С, гартування в мастилі за температури 860–900 °С, відпускання за температури 540–580 °С, визначена по всьому перерізу надісланій шийки і складає 235–241 НВ за максима-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

льної твердості, визначеної стандартом, DIN EN 10083-2 (2006), DIN17200 (1987) – 248 HB [8-9].

Твердість, що визначена на різних ділянках поверхні по всьому колу шийки, складає 407–494 HV, 603–857 HV, 286–396 HV. Відзначається, що під час замірів твердості за методом Віккерса на поверхні шийки частина відбитків «провалювала», а частина відбитків «розтріскувала» поверхню.

Мікроструктура матеріалу вала як на поверхні, так і далеко від неї однакова і представляє собою сорбіт із дуже незначною кількістю фериту.

За макро- і мікроструктурою азотований шар на поверхні даної шийки не виявлений через підвищений знос поверхні. Під час дослідження мікроструктури встановлено, що процес зношування і наклепування робочої поверхні шийки колінчастого вала супроводжувався значними структурними змінами. У зоні глибиною до 0,2–0,3 мм від зовнішньої поверхні вала за аналізом мікроструктури виявлено поверхневий шар зі слідами перегріву, зношування, руйнування, схоплювання та течії металу, налипання і проникнення в матеріал вала робочого шару вкладишів, початкові мікротріщини.

На поверхні шийки вала виявлені потовщення границь зерен металу, що свідчить про перегрів поверхневого шару. Руйнування поверхневого шару починається із тріщин по границях зерен і призводить до викришування. У цих структурних зонах виникли початкові ділянки втомного руйнування.

Метал шийки колінчастого вала, за макро-структурою протравлених темплетів, щільний. Ознак усадочних раковин, розшарування, флокенів, тріщин, скупчення неметалічних включень (засмічень) не спостерігається.

«Свіжий» злам матеріалу вала дрібнозернистий, без наявності кам'янистості та різко вираженої шаруватості.

Параметри шорсткості робочої поверхні шийки колінчастого вала – Ra 3,6, що відповідає 5-му класу.

Хімічний аналіз мастила М-14Г2, яке було застосовано для роботи дизеля, показав наявність забруднення продуктами зносу підшипників або їх корозії (табл. 3).

Таблиця 3

Table 3

Вміст у мастилі М-14Г2 продуктів зносу та корозії

The content of wear and corrosion products in the lubrication M-14G2

Хімічний елемент	Одиниця вимірювання	Показник
Fe	mg/kg	4
Cr	mg/kg	1
Sn	mg/kg	3
Al	mg/kg	3
Ni	mg/kg	0
Cu	mg/kg	17
Pb	mg/kg	15
Mn	mg/kg	1
Індекс PQ		35

Найбільша кількість елементів видалена з бабітових підшипників та сталі колінчастого вала (Fe, Cu, Pb).

Спостерігається забруднення мастила найбільш небезпечною кількістю дизельного палива > 17 %, якого зовсім не має бути у складі мастила (табл. 4).

Таблиця 4

Table 4

Забруднення у складі мастила М-14Г2

Contamination in content of lubrication M-14G2

Речовина	Одиниця виміру	Показник
Si	mg/kg	10
K	mg/kg	2
Na	mg/kg	11
Li	mg/kg	3
Вода	%	< 0.10
ІР гліколь	–	негативна
Дизельне паливо	%	17,01
Біодизельне паливо	%	0,30
Вміст сажі	%	1,1

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

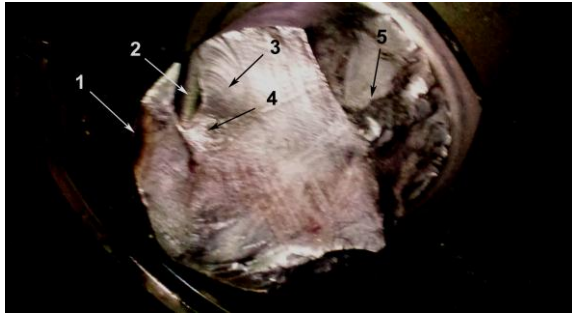
Згідно з дослідженнями авторів [1-2, 4-7, 10-16], змащувальні властивості мастила, а також його забрудненість значно впливає на ефективність та безаварійність роботи дизеля.

Аналіз наданої для експертизи інформації показує, що в якості причини руйнування вала

дизеля тепловоза 2ТЕ116 № 969 може розглядатися втомне руйнування внаслідок попереднього руйнування частини шатунного вкладиша відповідної позиції.

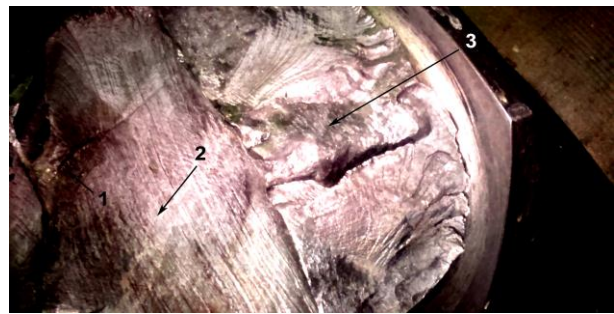
Характерні фрагменти поверхні руйнування наведено на рис. 3.

a – a



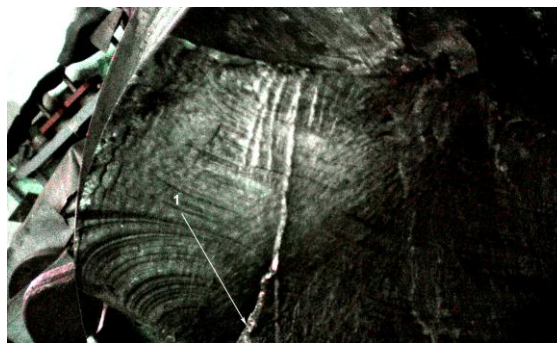
- 1 – зона локального термічного впливу;
2 – маслопровідний канал; 3 – ділянка послідовного втомного руйнування від місця 4 біля маслопровідного каналу;
4 біля маслопровідного каналу;
5 – зони швидкого доламу вала
- 1 – zone of local thermal influence; 2 – oil passage;
3 – a section of consecutive fatigue fracture from the place 4 near the oil passage;
5 – section of quick shaft break

б – б



- 1 – тріщиноподібний дефект;
2 – область послідовного втомного руйнування металу вала; 3 – зони доламу вала
- 1 – crack-like defect; 2 – section of consecutive fatigue destruction of the crankshaft metal;
3 – crankshaft break section

в – в



- 1 – тріщиноподібний дефект із фрагментом крихкого руйнування
- 1 – crack-like defect with the brittle fracture fragment

Рис. 3. Характерні фрагменти поверхні руйнування колінчастого вала

Fig. 3. Typical fragments of the crankshaft destruction surface

З огляду на відсутність дефектів металу за даними технічного звіту, наданого ПрАТ «ДТРЗ», тріщиноподібний дефект 1 (рис. 2, в), який має невелику ділянку крихкого руйнуван-

ня, розташований перпендикулярно до основного напрямку втомного руйнування 2 (рис. 2, б).

Тріщиноподібний дефект 1 (рис. 2, в) з ділянкою крихкого руйнування міг з'явитися

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в умовах зниженої ударної в'язкості внаслідок серії ударних навантажень після часткового руйнування шатунного вкладиша. Тоді концентратор напружень, що обов'язково виникає в перенапруженій зоні між дефектом та маслопровідним каналом 2 (рис. 2, а), стає джерелом розповсюдження втомної тріщини. При цьому фрагменти зруйнованого вкладиша циркулювали певний час у системі змащення (рис. 4).

Слід відзначити, що в процесі роботи дизельного двигуна з пошкодженим поршневым вкладишем обов'язково виникають удари, під час фіксації яких дизель мав бути негайно зупинений.

Ураховуючи викладене, найбільш вірогідною причиною руйнування колінчастого вала можна вважати пошкодження та руйнування шатунного вкладиша тепловоза 2ТЕ116 № 969 з наступним втомним руйнуванням самого вала.

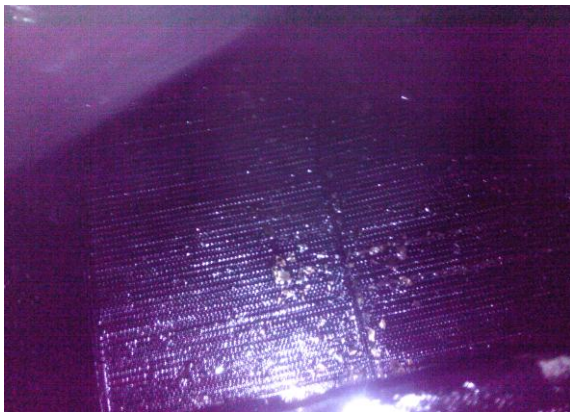


Рис. 4. Фрагменти зруйнованого вкладиша на сітці грубої очистки дизеля

Fig. 4. Fragments of the destroyed thrust bearing on the primary refining grid of the diesel

Руйнуванню та розплавленню шатунного вкладиша сприяло зниження змащувальних властивостей дизельного мастила за рахунок високої концентрації в ньому дизельного палива.

Для попередження руйнування вкладиша та колінчастого вала загалом на ранніх етапах формування тріщин автори пропонують ввести додаткову систему сигналізації та контролю за виявленням пошкоджень шляхом ідентифікації нагріву агрегата або його складових частин до температури, вищої за визначену критичну температуру для даної ділянки.

Наукова новизна та практична значимість

Науковою новизною даної роботи є пропозиція впровадження додаткових сигнальних та контрольних систем для попередження руйнування локомотива на ранніх стадіях розвитку несправностей, внесення вимог додаткового технічного огляду системи попередження руйнування дизелів локомотивів. Проведені дослідження дозволяють рекомендувати:

1. Неухильно дотримуватися технічних вимог щодо експлуатації дизеля Д49.

2. У регламентні роботи з технічного діагностування тягового рухомого складу для продовження строку його експлуатації [3, 5] одноразово внести додаткові роботи з діагностування температурного стану дизелів на перегрівання шляхом контролю стану зразків легкоплавких сплавів, розташованих на доступних для огляду деталях конструкції дизелю. Указані заходи допоможуть попередити передчасний вихід із ладу дизельних двигунів тепловозів.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Концентрація палива в мастилі колінчастого вала значно підвищена, у зв'язку з чим знижена в'язкість мастила та його змащувальні властивості.

2. Виплавлення бабітового шару та руйнування вкладишів, елементи яких частково були вимиті мастилом, сталося за рахунок підвищення температури у вузлах тертя дизеля.

3. Викришунані та частково виплавлені вкладиші забезпечили биття та додаткове тертя у вузлах дизеля, що також сприяло підвищенню температури і збільшувало навантаження вала.

4. Структурна неоднорідність колінчастого вала обумовила низькі характеристики матеріалу під час випробувань на ударну в'язкість.

5. Ускладнення умов роботи колінчастого вала разом з структурною неоднорідністю матеріалу викликало первинні тріщини та подальше втомне руйнування.

6. Основною причиною руйнування металу вала є перегрів у роботі дизеля, спричинений наявністю більше ніж 17 % палива в мастилі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Клименко, О. М. Оптимізація техніко-економічних показників автомобільного дизеля з використанням функції бажаності Харінгтона / О. М. Клименко, В. О. Пильов, І. М. Шульга // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. : Транспортне машинобудування. – Харків, 2015. – № 43 (1152). – С. 30–32.
2. Пожидаєв, І. Г. Проектування ПНВТ для акумуляторної паливної системи малолітражного дизеля на базі паливного насоса двигуна 2ДТ / І. Г. Пожидаєв, А. О. Прохоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 14 (1057). – С. 89–95.
3. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро та дизель-поїздів) : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 30.06.2010 р. № 093. – Київ : Укрзалізниця, 2010. – 25 с.
4. Розвиток методів зміцнення найбільш навантажених деталей – шлях до підвищення технічних і тактико-технічних характеристик машин / М. А. Ткачук, С. О. Кравченко, В. В. Шпаковський, М. Л. Белов, О. І. Шейко, В. І. Демиденко // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2015. – № 43 (1152). – С. 116–122.
5. Тепловозные дизели типа Д49 / Е. А. Никитин, В. М. Ширяев, В. Г. Быков [и др.] ; под ред. Е. А. Никитина. – Москва : Транспорт, 1982. – 255 с.
6. Триньов, О. В. Перспективи поліпшення теплового стану деталей клапанного вузла дизеля з використанням локального охолодження / О. В. Триньов, В. Г. Панчошний // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2015. – № 43 (1152). – С. 144–150.
7. Azadi, M. Corrosion Failure Study in an Oil Cooler Heat Exchanger in Marine Diesel Engine / M. Azadi, M. Azadi // International Journal of Engineering. – 2016. – Vol. 29. – Iss. 11. – P. 1604–1611. doi: 10.5829/idosi.ije.2016.29.11b.15
8. BS EN 10250-3:2000. Open die steel forgings for general engineering purposes. Part 3: Alloy special steels Brussels. – London, 1999. – 16 p.
9. DIN EN 10083-2. Steels for quenching and tempering. Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels. – Berlin, 2006. – 58 p.
10. Froelund, K. Lubricating Oil Consumption Measurements on an EMD 16-645E Locomotive Diesel Engine / Kent Froelund, Steve Fritz, Brian Smith // Design, Application, Performance and Emissions of Modern Internal Combustion Engine Systems and Components : Conference Paper (Salzburg, Austria, May 11–13, 2003). – Salzburg, 2003. – P. 361–368. doi: 10.1115/ices2003-0549
11. Multibody Dynamics Model of a Diesel Engine and Timing Gear Train with Experimental Validation / A. D. Foltz, T. M. Wasfy, Erik Ostergaard, Ilya Piraner // ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Phoenix, Arizona, USA, November 11–17, 2016). – Phoenix, 2016. – Vol. 4B : Dynamics, Vibration, and Control. – P. 4–22. doi: 10.1115/imece2016-65900
12. Priebisch, H. H. Simulation of the Oil Film Behaviour in Elastic Engine Bearings Considering Pressure and Temperature Dependent Oil Viscosity / H. H. Priebisch, J. Krasser // Tribology Series. – 1997. – Vol. 32. – P. 651–659. doi: 10.1016/S0167-8922(08)70490-5
13. Sequera, A. J. Effects of fuel injection timing in the combustion of biofuels in a diesel engine at partial loads / A. J. Sequera, R. N. Parthasarathy, S. R. Gollahall // Journal of Energy Resources Technology. – 2011. – Vol. 133. – Iss. 2. doi: 10.1115/1.4003808
14. Sevast'yanov, S. I. Adsorption and corrosion activity of diesel oils / S. I. Sevast'yanov // Soviet Materials Science. – 1968. – Vol. 3. – Iss. 6. – P. 493–497. doi: 10.1007/bf01156409
15. Wong, V. W. Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies / V. W. Wong, S. C. Tung // Friction. – 2016. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 1–28. doi: 10.1007/s40544-016-0107-9
16. Zammit, J-P. Thermal coupling and energy flows between coolant, engine structure and lubricating oil during engine warm up / J-P Zammit, P. J. Shayler, I. Pegg // Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition (VTMS10). – Sawston : Woodhead Publishing, 2011. – P. 177–188. doi: 10.1533/9780857095053.3.177

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В. Л. ГОРОБЕЦ¹, В. В. КОВАЛЕНКО^{2*}

¹Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 08, эл. почта v-gorobets@mail.ru, ORCID 0000-0002-6537-7461

^{2*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, эл. почта kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ТЕПЛОВОЗА 2ТЭ116

Цель. Работа направлена на выявление причин преждевременного разрушения коленчатого вала тепловоза 2ТЭ116. **Методика.** Применены макроструктурный, фрактографический, аналитический анализы. Они позволили выявить причины преждевременного разрушения вала. **Результаты.** В данной работе предметом исследования является не только структурное состояние и свойства материала вала, а и химические свойства окружающей среды, рабочей жидкости и состояние рабочей документации по эксплуатации указанного тепловоза. Проведенные в работе исследования показали: 1) несоответствие ударной вязкости материала коленчатого вала требованиям соответствующего стандарта; 2) наличие в химическом составе масла более 17 % дизельного топлива, что значительно повышает коэффициент трения в рабочем механизме за счет образования нагара, областей сцеплений и питтинговую коррозию металла. **Научная новизна.** В работе применен комплексный аналитический и технический подход к выявлению причин преждевременного разрушения коленчатого вала тепловоза 2ТЭ116. Оценено максимальное количество факторов, которые могли повлиять на преждевременное разрушение коленчатого вала. Показано, что совокупность факторов, негативно повлиявших на эксплуатационные характеристики коленчатого вала, достигла так называемой «критической массы», что неизбежно вызвало разрушения. Внедрение дополнительных факторов сигнализации (кроме шумового фактора в процессе работы дизеля с маслом, загрязненным более чем на 17 % дизельным топливом) и контроля неисправностей в работе подобных крупных механических агрегатов позволит дополнительно дисциплинировать машинистов и слесарей при выполнении работ по инструкциям для предупреждения разрушения больших конструкций локомотивов. **Практическая значимость.** Исследования подтвердили важность контроля над химическим составом и механическими характеристиками деталей и конструкций подвижного состава. Показана необходимость периодического контроля химического состава масла. Надзор за аккуратным ведением рабочего журнала может предупредить разрушение ценных конструкций подвижного состава.

Ключевые слова: дизель; тепловоз 2ТЭ116; масло; преждевременное разрушение; коленчатый вал; механические характеристики

V. L. HOROBETS¹, V. V. KOVALENKO²

¹Dep. «Life Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 08, e-mail v-gorobets@mail.ru, ORCID 0000-0002-6537-7461

²Dep. «Life Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 489 07 72, e-mail kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

INVESTIGATION OF PREMATURE DESTRUCTION CAUSES OF LOCOMOTIVE 2TE116 CRANKSHAFT

Purpose. The work is aimed at identifying the causes of premature destruction of the locomotive 2TE116 crankshaft. **Methodology.** Macrostructural, fractographic, and analytical analyses have been used to identify the causes of premature destruction of the shaft. **Findings.** In this work, the subject of the study is not only the structural state and properties of the shaft material, but also the chemical properties of the environment, the working fluid and the state of the working documentation for the locomotive operation. The research carried out in the work showed: 1) the non-conformity of the impact viscosity of the crankshaft material to the requirements of the relevant standard; 2) the presence of more than 17% of diesel fuel in the chemical composition of oil, which significantly increases the

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

friction coefficient in the working mechanism due to the formation of carbon deposit, the areas of adhesion and pitting corrosion of the metal. **Originality.** A comprehensive analytical and technical approach for identification of premature destruction causes of the locomotive 2TE116 crankshaft was used in the work. The maximum number of factors that could influence the premature destruction of the crankshaft were estimated. It was shown that the combination of factors that negatively influenced the performance characteristics of the crankshaft has reached the so-called «critical mass», which inevitably caused the destruction. Introduction of additional signaling factors (in addition to the noise factor during the operation of the diesel engine with oil contaminated by diesel fuel more than 17%) and fault monitoring in the operation of such large mechanical aggregates will additionally discipline locomotive drivers and mechanics when working on instructions for warning destruction of large locomotive structures. **Practical value.** The studies confirmed the importance of controlling the chemical composition and mechanical characteristics of rolling stock components and constructions. The need for periodic control of the oil chemical composition is shown. Supervision over the careful keeping of work book can prevent the destruction of valuable structures of rolling stock.

Keywords: diesel engine; diesel locomotive 2TE116; oil; premature destruction; crankshaft; mechanical characteristics

REFERENCES

1. Klymenko, O. M., Pylov, V. O., & Shulha, I. M. (2015). Optyimizatsiia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv avtomobilnoho dyzelia z vykorystanniam funktsii bazhanosti Kharinhona. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» : zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Transportne mashynobuduvannia*, 43 (1152), 30-32. (in Ukrainian)
2. Pozhydaiev, I. H., & Prokhorenko, A. O. (2014). Proektuvannia PNVT dlia akumuliatornoj palyvnoi systemy malolitrazhnoho dyzelia na bazi palyvnoho nasosa dvyhuna 2DT. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI». Serii: Transportne mashynobuduvannia : zbirnyk naukovykh prats*, 14 (1057), 89-95. (in Ukrainian)
3. Polozhennia pro planovo-poperedzhuvalnu systemu remontu i tekhnichnoho obsluhovuvannia tiahovoho rukhomoho skladu (elektrovoziv, teplovoziv, elektro ta dyzel-poizdiv) : Nakaz Ministerstva transportu ta zviazku Ukrainy vid 30.06.2010 r. № 093. (in Ukrainian)
4. Tkachuk, M. A., Kravchenko, S. O., Shpakovskyi, V. V., Bielov, M. L., Sheiko, O. I., & Demydenko, V. I. (2015). Rozvytok metodiv zmitsnennia naibilsh navantazhenykh detalei - shliakh do pidvyshchennia tekhnichnykh i taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk mashyn. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Transportne mashynobuduvannia : zbirnyk naukovykh prats*, 43(1152), 116-122. (in Ukrainian)
5. Nikitin, Y. A., Shiryayev, V. M., & Bykov, V. G. (1982). *Teplovozyne dizeli tipa D49*. Moscow: Transport. (in Russian)
6. Trynov, O. V., & Panchoshnyi, V. H. (2015). Perspektyvy polipshennia teplovoho stanu detalei klapannoho vuzla dyzelia z vykorystanniam lokalnoho okholodzhennia. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Transportne mashynobuduvannia : zbirnyk naukovykh prats*, 43(1152), 144-150. (in Ukrainian)
7. Azadi, M. (2016). Corrosion failure study in an oil cooler heat exchanger in marine diesel engine. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 29 (11), 1604-1611. doi: 10.5829/idosi.ije.2016.29.11b.15 (in English)
8. Open die steel forgings for general engineering purposes D Part 3: Alloy special steels Brussels. BS EN 10250-3:2000 (1999). (in English)
9. Steels for quenching and tempering – Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels. DIN EN 10083-2 (2006). (in English)
10. Froelund, K., Frits, S., & Smith, B. (2003). Lubricating Oil Consumption Measurements on an EMD 16-645E Locomotive Diesel Engine. *Design, Application, Performance and Emissions of Modern Internal Combustion Engine Systems and Components: Conference Paper (Salzburg, Austria, May 11–13, 2003)*, 361-368. doi: 10.1115/ices2003-0549 (in English)
11. Foltz, A. D., Wasfy, T. M., Ostergaard, E., & Piraner, I. (2016). Multibody Dynamics Model of a Diesel Engine and Timing Gear Train with Experimental Validation. *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Phoenix, Arizona, USA, November 11–17, 2016)*, 4B: Dynamics, Vibration, and Control, 4-22. doi: 10.1115/imece2016-65900 (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

12. Priebisch, H. H., & Krasser, J. (1997). Simulation of the Oil Film Behaviour in Elastic Engine Bearings Considering Pressure and Temperature Dependent Oil Viscosity. *Tribology Series*, 32, 651-659. doi: 10.1016/S0167-8922(08)70490-5 (in English)
13. Sequera, A. J., Parthasarathy, R. N., & Gollahall, S. R. (2011). Effects of fuel injection timing in the combustion of biofuels in a diesel engine at partial loads. *Journal of Energy Resources Technology*, 133(2). doi: 10.1115/1.4003808 (in English)
14. Sevast'yanov, S. I. (1968). Adsorption and corrosion activity of diesel oils. *Soviet Materials Science*, 3(6), 493-497. doi: 10.1007/bf01156409 (in English)
15. Wong, V. W., & Tung, S. C. (2016). Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. *Friction*, 4(1), 1-28. doi: 10.1007/s40544-016-0107-9 (in English)
16. Zammit, J-P., Shayler, P. J., & Pegg, I. (2011). Thermal coupling and energy flows between coolant, engine structure and lubricating oil during engine warm up. *Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition (VTMS10)*, 177-188. doi: 10.1533/9780857095053.3.177 (in English)

Надійшла до редколегії: 23.04.2018

Прийнята до друку: 20.07.2018

UDC 629.4.02

M. I. KAPITSA^{1*}, O. M. HNENNYI^{2*}, D. V. BOBYR^{3*}^{1*}Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 19 61, e-mail m.i.kapitca@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920^{2*}Dep. «Economics and Management», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 80, e-mail oleggnennij@gmail.com, ORCID 0000-0002-2944-5105^{3*}Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 19 61, e-mail dmitrob@ua.fm, 0000-0003-1441-3861**EFFICIENCY OF MODERNIZATION OF WHEEL-MOTOR BLOCKS USING ANTI-FRICTION TRACTION MOTOR SUPPORT BEARINGS**

Purpose. The use of anti-friction traction motor support bearings (TMSB) instead of plain friction traction motor support bearings is a priority direction of locomotive development both for newly constructed locomotives and for those in operation. The solution of the set tasks for introduction of wheel-motor blocks (WMB) with anti-friction bearings demanded the search for alternative variants and new technical solutions. The purpose of the article is to determine the feasibility of re-equipping the diesel locomotive wheel-motor blocks with anti-friction bearings through the life cycle calculation (*LCC*). **Methodology.** The procedure and criteria for assessing the economic efficiency of project (investment) proposals and investment projects approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine envisage that the cost-effectiveness analysis of an investment project is carried out according to the following criteria: net present value, internal rate of return, discounted payback period and profitability index. The use of these criteria of economic efficiency fully corresponds to modern principles, theoretical-methodical approaches and world practice in evaluating the efficiency of investments. The evaluation of the technical and economic efficiency of the modernization of the diesel locomotive wheel-motor block is made on the basis of calculation and comparison of the following criteria: the net present value (*NPV*) of modernization, the internal rate of return (*IRR*), the profitability index (*PI*) and the discount payback period. **Findings.** The results of the calculations of the values of the main criteria show that the innovative project for the modernization of the locomotive provides a high level of economic efficiency. At the same time, the value of the discounted payback period of investments in modernization indicates that it is expedient to carry out this operation if the residual life of the upgraded locomotive of the M62 series is at least 15 months. **Originality.** Taking into account the specifics of the type of locomotive work in freight traffic, we developed a method to determine the individual components of the average annual economic effect of modernization of the diesel locomotive wheel-motor block, which includes saving of oil costs, repairing and servicing the diesel locomotive wheel-motor unit, as well as change of TMSB brass and saving fuel costs for traction. **Practical value.** The results of the work make it possible to determine the expediency of modernization of diesel locomotives taking into account the features and conditions of their operation and the specifics of modernization.

Keywords: diesel locomotive modernization; wheel-motor block; technical and economic efficiency; anti-friction bearings; life cycle

Introduction

The priority direction of the investment policy of PJSC «Ukrzaliznytsia» in the locomotive economy of Ukraine in recent years is to provide a quick, comprehensive renovation and optimization of the traction rolling stock structure. This is due to the fact that most of the traction rolling stock was procured and delivered to operation even in Soviet times. Analysis of the state of the operating fleet of the traction rolling stock of Ukrainian railways indicates that its wear is 97.1% [11]. As it

is known, the results of rail transport activity in general depend on the level of technical excellence and the state of the traction rolling stock, conditions of its operation, repair and maintenance systems [14, 15].

The traction rolling stock may be renewed due to the purchase of a new one and the modernization of the existing one. In both cases, this requires significant capital investments. It is also necessary to take into account that the return on investments in modernization of locomotives is 3-4 times faster than in their acquisition. Therefore, in the context of market relations and financial constraints, the problem of

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

investment support for the renewal of the tractive rolling stock of the locomotive economy of Ukrainian railways is put forward at the level of problems of national importance, the solution of which directly affects the provision of national security.

During the last years, the Department of the Locomotive Economy has introduced a number of steps for modernization of the traction rolling stock, aimed at reducing the cost of repairs and fuel and lubricants in operation. Directions of accomplished and planned modernizations mainly concern the replacement of power equipment. However, no less effective direction of modernization of the traction rolling stock is the improvement of underframe design, namely the refitting of WMB from plain friction bearings to anti-friction bearings [2].

Anti-friction bearings have several advantages over plain friction bearings. The main advantage of anti-friction bearings in comparison with plain friction bearings is the lower energy consumption for the friction process (friction moment in ball bearings is approximately 3-6 times less than that of plain friction bearings [6, 12]).

All new foreign locomotives are equipped with anti-friction TMSB. Their implementation allows conducting the locomotive maintenance M-2 not every 3-4 days, but every 10-12 or more. It is the replenishment of the plain friction TMSB with axial oil that requires the need for such frequent maintenance M-2 for 90% of the locomotive fleet [12].

Estimated resource of anti-friction TMSB is not less than 5 million km of locomotive mileage. Application of wheel-motor blocks with anti-friction TMSB increases the cost of a locomotive, but pay-back is achieved due to the presence of the following factors:

- Exclusion from the technological process of servicing and repair of WMB of axial oils and the necessity of their seasonal change;
- Cost reduction for technical maintenance and repairs of the WMB with anti-friction TMSB;
- Increase of reliability and service life of traction gear and traction electric motor (TEM) due to absence of distortion caused by wear of brass inserts of plain friction traction motor support bearings;
- Increase in the wheel set life cycle due to the lack of wear of the journals under the plain friction TMSB;

– Absence of the need to pay fines for environmental pollution by eliminating the leakage of axial oils on the permanent way;

– Increase in the locomotive profitability – increase in the use of power for draft, increase in efficiency by reducing the main resistance of the locomotive, and, accordingly, reducing fuel consumption for traction from 2% to 6.6% [8, 12].

Thus, the use of anti-friction TMSBs instead of plain friction TMSBs is a priority direction for locomotive development for newly constructed locomotives and for those in operation.

The solution of the set tasks for introduction of WMB with anti-friction bearings demanded the search for alternative variants and new technical solutions. Therefore, the specialists of «Scientific and Technical Center «Pryvod» LLC and PJSC «Scientific-Production Enterprise «Smelyansky Electromechanical Plant» have been developed and patented in the State Intellectual Property Service of Ukraine (patent for utility model No. 84796 dated October 25, 2013) the project for modernization of WMB locomotive with anti-friction TMSB replacement.

Modernization of WMB consists of two stages:

- Modernization of traction electric motor with prolongation of service life for 15 years;
- Modernization of wheel set and the gear casing (if required).

In accordance with the technical specifications of TU U 30.2-38414897-004: 2014 «Modernization of wheel-motor blocks of locomotives including replacement of plain friction TMSB with the anti-friction TMSB», modernization of the traction motor is carried out during its overall repair. This includes the repair of the engine case, anchor and magnetic system with replacement of windings and isolation of the class of heat resistance not lower than «H», bearing units with the restoration of their sizes to drawings and the execution (if necessary) of improvements in accordance with the requirements of design documentation for modernization. Conducting of modernization can increase the TEM life for 15 years.

Purpose

The purpose of the article is to determine the technical and economic efficiency of the modernization of locomotive WMB TMSB with anti-friction bearings based on LCC calculations.

Methodology

At the present time in Ukraine there are several normative documents in the field of cost-effectiveness analysis of investments. The main ones are:

– Procedure and Criteria for Assessing the Economic Efficiency of Project (Investment) Proposals and Investment Projects, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine as of 18.07.2012, No. 684;

– Methodological Recommendations on Development of State Supported Investment Projects, approved by Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine as of 13.11.2012, No. 1279;

– Methodological Recommendations on Assessment of Economic and Social Efficiency of State Target Program Implementation, approved by Order of the Ministry of Economy of Ukraine as of 24.06.2010, No. 742;

– Methodology of Conducting State Expertise of Investment Projects, approved by Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine as of 13.03.2013, No. 243;

– Methodological Recommendations on Development of Business Plan of Enterprises, approved by Order of the Ministry of Economy of Ukraine as of 06.09.2006, No. 290;

– Methodology for Determining the Cost-effectiveness of Research and Development and their Implementation in Production, approved by Order of the Ministry of Economy and European Integration and the Ministry of Finance of Ukraine as of 26.09.2001, No. 218/446.

The Procedure and Criteria for Assessing the Economic Efficiency of Project (Investment) Proposals and Investment Projects, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine as of 18.07.2012 No. 684 stipulate that the assessment of the economic efficiency of an investment project is carried out according to the following criteria: net present value, internal rate of return, discounted payback period and profitability index. Herewith, the conclusion is positive about the effectiveness of the investment project, if the net present value is positive, the internal rate of return is greater than the standard discount rate, and the profitability index exceeds 1. The use of these criteria of economic efficiency fully corresponds to modern principles, theoretical and methodological approaches

and world practice regarding assessment of investment efficiency. However, the mentioned document does not contain specific methodological approaches, but suggests that the calculation of the criteria for the economic efficiency of an investment proposal, an investment project is carried out in the light of the Methodological Recommendations on Development of State Supported Investment Projects, approved by the Ministry of Economic Development and Trade.

Methodological Recommendations on Development of State Supported Investment Projects, approved by Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine as of 13.11.2012, No. 1279 contains (paragraph 2.8) the methodology for determining the above mentioned investment efficiency indices. At the same time, the methodological recommendations do not explain the issue of considering risks when assessing the effectiveness of the project. It is intended to provide in the project a separate section on information on project risks, precautionary measures and risk insurance in cases stipulated by law (paragraph 2.10). Herewith, only a qualitative characteristic of risks is foreseen. That is, the above Methodological Recommendations do not contain quantitative methods for assessing investment risks and their accounting procedure when assessing the cost-effectiveness of an investment project.

Methodological Recommendations on Assessment of Economic and Social Efficiency of State Target Program Implementation, approved by Order of the Ministry of Economy of Ukraine as of 24.06.2010, No. 742, among other things, contain an algorithm for calculating the four key indices of economic efficiency, which coincides with the methods presented in the above Methodical Recommendations on Development of Investment Project. It also proposes the use of several specific indices for innovative projects: value added, ratio of investments (private and public), commercialization coefficient and new product sales coefficient. In addition, the Methodical recommendations under consideration include methods for assessing the synergistic economic effect of program interaction, which allow assessing the economic effectiveness of the program as a system of interconnected projects, that is to move from the assessment of individual investment projects to the assessment of the effectiveness of their integrated implementation. The synergistic effect of program

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

interaction includes the effects of program centralization, concentration, specialization, cooperation and replication of intermediate and final results. The mentioned Methodological Recommendations contain methodological approaches to the determination of each of these effects. However, these Methodological Recommendations do not also contain the methodological approaches to risk assessment in determining the cost-effectiveness of investment projects and programs.

Methodological Recommendations on Development of Business Plan of Enterprises, approved by Order of the Ministry of Economy of Ukraine as of 06.09.2006, No. 290 contain methodological approaches for forecasting cash flows from the activity of the enterprise and determination of economic investment efficiency indices, which, in general, coincide with the Methodological Recommendations on Development of Investment Project, are more detailed. The Methodological Recommendations under consideration also do not include approaches to quantitative investment risk. However, based on the analysis of paragraph 2.1.10.3 of the Methodological Recommendations, one can conclude that the main way of taking into account the risks in assessing the economic efficiency of investments is to increase the discount rate by the risk premium, since it is determined that «discount rate (r) is the rate of profit, that investors usually receive from investments of similar content and degree of risk».

Methodology for Determining the Cost-effectiveness of Research and Development and their Implementation in Production, approved by Order of the Ministry of Economy and European Integration and the Ministry of Finance of Ukraine as of 26.09.2001, No. 218/446 contains approaches to the definition of key indices of economic efficiency of projects. At the same time there are differences with the previously considered normative acts in determining the «profitability index». So in these recommendations it is defined as the ratio of net discounted income to the discounted investment value, and in all other regulatory acts – as the ratio of the present value of the results (net cash inflow) to the present value of investment outlay. As the Procedure and Criteria for Assessing the Economic Efficiency of Project (Investment) Proposals and Investment Projects, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine as of 18.07.2012 No. 684 determines the efficiency criterion as the profitability

index higher than 1, more correct definition of this index is given in the Methodological Recommendations on Development of State Supported Investment Projects, approved by Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine as of 13.11.2012, No. 1279. However, the Methodology for Determining the Cost-effectiveness of Research and Development and their Implementation in Production contains certain elements of methodological approaches to risk assessment when measuring efficiency. Thus, the paragraphs 3.20 and 3.21 of the Methodology stipulate that mid-term and long-term R & D projects concerning the timing of their implementation need to take into account the uncertainty and risk factor. The following methods can be used to take into account the uncertainty and risk factor: verification of project sustainability, adjustment of project parameters, formal description of uncertainty. The project sustainability is determined by the break-even point. Correction of project parameters is based on refinement of the initial technical and economic task, including the terms of the project due to delays in financing its stages, procedural violations in the implementation of innovations, violation of terms of feedstock supply and other complications. In all cases of such violations the resulting losses are added to the project cost structure. The paragraph 3.22 (formula 3.16) of the Methodology stipulates the application of a capital asset valuation model to determine the discount rate allowing for risk.

Thus, domestic regulatory acts in the field of cost-effectiveness analysis of innovation and investment projects reflect a certain methodical toolkit on the structure of forecast cash flows, the definition of their components, the calculation of the main indicators of economic efficiency of investment, taking into account the factor of time, which in general corresponds to the modern theoretical foundations of cost-effectiveness analysis and project analysis [1, 3, 4, 7, 10, 13, 15].

A cost-effectiveness analysis of an innovation and investment project is carried out at such stages.

- I. Determination of project life cycle.
- II. Forecast of cash flows by the base project scenario.
- III. Quantitative assessment of the risk level of the project.
- IV. Determination of discount rates for the base investment project scenario based on the rate of return and risk level.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

V. Determination of indices of effectiveness by the base scenario and discount rate allowing for risk premium.

The net present value of the innovation and investment project is determined by the formula:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{E_t}{(1+R)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{I_t}{(1+R)^t}, \quad (1)$$

where NPV – net present value; R – discount rate; T – project life cycle; E_t – the result (economic effect) of the project in the t -th period; I_t – investment costs of the project in t -th period.

The criterion for project efficiency is the positive value of NPV .

When forecasting the results and costs of a project in this work we use the concept of base (fixed for a certain date) prices. Therefore, in the project under consideration, the forecasted economic effect varies little over the years of the investment life cycle and can be taken at the average annual level. Investment costs of the project arise only in the beginning of the investment life cycle and equal to the locomotive modernization cost. Therefore, the formula for determining the net present value of a project can be presented as:

$$NPV = \bar{E} \cdot \frac{1-(1+R)^{-T}}{R} - I, \quad (2)$$

where \bar{E} – annual economic effect of locomotive modernization; I – locomotive modernization cost; T – useful life of the locomotive.

The project internal rate of return is defined as the discount rate, according to which the net present value of the project is zero. It is established by solving the equation:

$$\bar{E} \cdot \frac{1-(1+IRR)^{-T}}{IRR} - I = 0, \quad (3)$$

where IRR is the internal rate of return.

The project effectiveness criterion is the excess of the internal rate of return over the discount rate.

The project profitability index (PI) is determined by the formula:

$$PI = \frac{\bar{E} \cdot \frac{1-(1+IRR)^{-T}}{IRR}}{I}. \quad (4)$$

The project effectiveness criterion is the value of the profitability index, which is greater than or equal to one.

The discounted payback period of the project investments is defined as the period from the start of the life project cycle to the moment after which the accumulated net present value of the portfolio becomes and continues to remain positive. The effectiveness criterion is the magnitude of the dynamic payback term, which is less than or equal to the duration of the life portfolio cycle.

Under the basic prices when forecasting cash flows we exclude the inflation component from the composition of the discount rate by the formula:

$$R = \frac{R_n - i}{1 + i}, \quad (5)$$

where R – real discount rate; R_n – nominal rate discount; i – forecasted inflation rate.

The cost-effectiveness analysis of locomotive modernization is carried out on the basis of comparison of costs with the results arising from the modernization during the life cycle of the locomotive.

The life cycle is taken equal to the normative lifetime of the diesel locomotive. As investment costs we considered the costs associated with the higher cost of the wheel-motor block (WMB) with anti-friction TMSB in comparison with the WMB with plain friction TMSB. The results are saving operating costs, which are provided by the replacement of plain friction TMSB with anti-friction TMSB. The mentioned costs are taken into account in locomotive modernization cost.

The average annual economic effect of locomotive modernization consists of operating costs saving associated with the locomotive operation, and includes:

- oil cost savings;
- cost savings for repair and maintenance of diesel locomotive wheel-motor blocks, including the change of TMSB brass;
- fuel consumption saving for hauling operations.

The oil cost savings are determined based on the amount of oil changes and refilling to the plain friction and anti-friction TMSB during repairs, the oil cost for changes (refilling) during maintenance and the price of the oil of the corresponding type.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The cost savings for repairing and servicing diesel locomotive wheel-motor blocks are determined on the basis of the complexity of the work involved, the tariff rates of the workers and the cost of the brasses used for changes.

The fuel consumption saving for hauling operations is determined on the basis of increasing the coefficient of useful efficiency of gear transmission with anti-friction TMSB, in comparison with plain friction TMSB.

The starting data for the cost-effectiveness analysis of diesel locomotive modernization are the operating norms of operation, maintenance and repair of locomotives of a particular series, data of the developer of modernization, statistical data of PJSC «Ukrzaliznytsia», State Statistics Service of Ukraine, National Bank of Ukraine and results of own researches of the executors of this work. Output data for cost-effectiveness analysis of modernization of M62 diesel locomotive are shown in Table 1, 2.

Table 1

Output data for cost-effectiveness analysis, differing in variants

Index	Unit of measure	Value for the locomotive with			
		Plain friction TMSB	Information source	Anti-friction TMSB	Information source
Oil used in TMSB	–	axial oil of «L», «Z» grades (GOST 610-72)	data of PJSC «UZ»	«Agrinol» oil	data of a developer
Frequency of full oil filling of TMSB	–	during repairs with disassembly of WMB, in the case of brass change, during seasonal oil change	[4]	CR-3, OR-1, OR-2	data of a developer
Frequency of TMSB oil refilling	–	M-2, M-3	[4]	CR-2	data of a developer
Amount of oil consumed when completely changed	l/lubr. point	12	data of PJSC «UZ»	1.5	data of a developer
Amount of oil consumed when refilled	l/lubr. point	0.4	data of PJSC «UZ»	0.15	data of a developer
Oil price, ex VAT	UAH/l	12.5	prozorro.gov.ua	51.82	data of a developer

Table 2

Output data for cost-effectiveness analysis, similar in variants

Index	Unit of measure	Value
Number of lubrication points	un./sect.	12
Normative inter-repair periods:		
– maintenance M-2	hours	72
– maintenance M-3	ths. km	10
– current repairs CR-1	ths. km	50
– current repairs CR-2	ths. km	95
– current repairs CR-3	ths. km	195
– overall repair OR-1	ths. km	780
– overall repair OR-2	ths. km	1 560

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Continuation of a table 2

Index	Unit of measure	Value
Number of lubrication points	un./sect.	12
Average rate of shed percentage of defective diesel locomotives	%	8
Normative term of operation of diesel locomotive	years	20
Hourly rate of rolling stock repair mechanic, taking into account all surcharges:		
– 3-rd category	UAH/year	33.47
– 5-th category	UAH/year	42.92
The rate of unified social tax	%	22
Average cost of the package of TMSB brasses, ex VAT	UAH/TMSB	50 000
Actual specific consumption of diesel fuel in freight traffic for M62 series locomotive	kg/10 000 t-km br.	34
Hourly fuel consumption at idle speed	kg/year	25
Average weight of freight train with M62 series locomotive	ton	3 781.82
Average mileage of M62 series diesel locomotives	km	416
Cost of diesel fuel, ex VAT	UAH/t	22 059
Increase in the efficiency coefficient of gear with anti-friction TMSB, in comparison with plain friction TMSB	times	1.055
Cost of modernization of the wheel-motor block under anti-friction TMSB, ex VAT	ths. UAH	357.6
Average technical speed	km/year	45.6

Findings

To determine the flow of lubricants to lubricate the TMSB, the number of repairs and maintenance for the life cycle of the diesel locomotive is determined in accordance with the repair cycle chart.

The assigned lifetime of the locomotive mileage is defined as a double life of the run prior to major repairs within OR-2, which is 3120 thousand km. Proceeding from the mileage resource of the M62 series locomotive and the standards of inter-repair runs, the normative quantity of repairs and maintenance of the locomotive for a life cycle is determined, which is:

- OR-2 – 1 repair;
- OR-1 – 2 repairs;
- CR-3 – 12 repairs;
- CR-2 – 17 repairs;
- CR-1 – 29 repairs;
- M-3 – 250 maintenances per cycle;
- M-2 – 112 maintenances per year.

When performing the overall, current repairs, as well as maintenance for the locomotives with

plain friction TMSB, during a seasonal oil change, its full replacement is carried out. In the course of maintenance, the plain friction TMSBs are refilled with oil [5]. The oil consumption for a complete change for the plain friction TMSB is: $12 \cdot 12 = 144$ l for the locomotive section, for oil refilling: $12 \cdot 0.4 = 4.8$ l for the locomotive section. Thus, the average annual oil consumption for plain friction TMSB reaches 1 322.4 l.

When performing the overall and current repairs for diesel locomotives with anti-friction TMSB within CR-3, a complete change of oil is carried out. When performing maintenance within M-2, the anti-friction TMSBs are refilled with oil. The oil consumption for a complete change for the anti-friction TMSB is: $12 \cdot 1.5 = 18$ l for the locomotive section, for oil refilling: $12 \cdot 0.15 = 1.8$ l for the locomotive section. Thus, the average annual oil consumption for the anti-friction TMSB reaches 15.93 litres.

Taking into account the loss of oil when pouring and refilling (10%), the average annual cost of lubricants is:

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– for locomotive with plain friction TMSB – 18 183 UAH;

– for locomotive with anti-friction TMSB – 908 UAH.

The cost savings for lubricants are: $18\,183 - 908 = 17\,275$ UAH per year.

Costs for maintenance and repair of M62 locomotive WMB with plain friction and anti-friction TMSB include the costs associated with:

– remuneration of employees engaged in the maintenance and repair of WMB, the level of which is determined by the complexity and skill of repair personnel;

– cost of materials and spare parts for maintenance and repairs.

Labor costs are determined on the basis of the list of TMSB-related works performed during maintenance and repairs, the normative level of work and the value of the standard hour of the respective category. It takes into account the time factor for support needs 1.093 (for preparatory and final actions 3.5%, time for servicing the workplace 3.1%, time for rest and personal needs 2.7%, total – 9.3%).

The labor intensity of the anti-friction TMSB maintenance is adopted at the level of 25% of the corresponding value for the plain friction TMSB

due to simplification of the process of servicing the anti-friction TMSB.

The costs associated with remuneration are given in Table. 3

Table 3 shows that the average annual labor costs are: for the plain friction TMSB $18\,1926/20 = 9\,096$ UAH, for the anti-friction TMSB $19\,412/20 = 971$ UAH. Thus, the cost savings associated with remuneration are $9\,096 - 971 = 8\,125$ UAH per year.

During the lifecycle of the M62 series locomotive, when performing overhaul repair, a complete change of the TMSB brasses is performed. During CR-3 current repairs 35% of brasses are changed. The cost of the package of TMSB brasses is 50 thousand UAH ex VAT. Thus, the average annual cost savings for spare parts is:

$$\frac{(50\,000 \cdot (1+2) + 50\,000 \cdot 12 \cdot 0.35) \cdot 12}{20} = 216\,000 \text{ UAH/year.}$$

In the middle conditions of operation, the M62 series diesel locomotive (incl. the idle time in repairs) per year carries out gross turnover in the amount of:

Table 3

Calculation of expenses connected with remuneration of labour for work with TMSB during repairs and maintenance of M62 series diesel locomotive during the life cycle

Type of repair, maintenance	Class of work	Hourly rate, UAH	Labour intensity with allowance for auxiliary time, man-hour		Number of maintenances, repairs	Non-worked time rate	Payroll fund, UAH		Unified social tax, UAH		Total expenses, UAH		
			Plain friction	Anti-friction			Plain friction	Anti-friction	Plain friction	Anti-friction	Plain friction	Anti-friction	
M-2	3	33.47	0.38	0	2240	1.1	31 339	0	6 895	0	38 234	0	
M-3	5	42.92	4.59	0	250	1.1	54 176	0	11 919	0	66 095	0	
CR-1	5	42.92	12.1	3.03	29	1.1	16 567	4 149	3 645	913	20 212	5 062	
CR-2	5	42.92	16.26	4.07	17	1.1	13 050	3 267	2 871	719	15 921	3 986	
CR-3	5	42.92	38.13	9.53	12	1.1	21 602	5 399	4 752	1 188	26 354	6 587	
OR	5	42.92	87.44	21.86	3	1.1	12 385	3 096	2 725	681	15 110	3 777	
Total per life cycle								149 119	15 911	32 807	3 501	181 926	19 412

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$3781.82 \cdot 416 \cdot (1 - 0.08) \cdot 365 \cdot 10^{-6} = \\ = 528.3 \text{ mln. t-km br.}$$

Specific fuel consumption is 34 kg per 10000 ton-km br. Total fuel consumption per year reaches

$$\frac{528.3 \cdot 10^6 \cdot 34}{10000} \cdot 10^{-3} = 1796.22 \text{ tons.}$$

Average section speed reaches 45.6 km/h, then time in the movement of the diesel locomotive of the operating rolling stock is

$$\frac{416}{45.6} = 9.12 \text{ hours per day.}$$

The annual budget of idle time in «hot» condition of the M62 series locomotive reaches:

$$(24 - 9.12) \cdot 365 \cdot (1 - 0.08) = 4997 \text{ hours per year.}$$

Fuel consumption for idle time in «hot» condition reaches:

$$4997 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 124.9 \text{ tons.}$$

Fuel consumption of the M62 series locomotive in the train operation reaches:

$$1796.22 - 124.9 = 1671.32 \text{ tons.}$$

Since the gear ratio efficiency of the anti-friction TMSB is 1.055 times higher than that of the plain friction TMSB, fuel savings will average over the year

$$1671.32 - \frac{1671.32}{1.055} = 87.1 \text{ tons.}$$

At the cost of diesel fuel of 22059 UAH/ton, the annual saving in fuel consumption for hauling operation will be:

$$87.1 \cdot 22059 = 1921339 \text{ UAH per year.}$$

The overall average annual economic effect of modernizing the section of the M62 series locomotive reaches:

$$(17275 + 8125 + 216000 + 1921339) \cdot 10^{-3} = \\ = 2162.7 \text{ ths. UAH per year.}$$

Investment costs per M62 series locomotive section are defined as the product of the number of WMBs and the cost of upgrading one WMB and equal to:

$$6 \cdot 357.6 = 2145.6 \text{ ths. UAH ex VAT.}$$

The discount rate is determined using the model of capital asset valuation (β -method) as the cost of capital invested in the field of economic activity «Transport».

The risk factor β is defined as the ratio of the covariance of the return of the investigated investment asset and the capital market return.

As a measure of return on investment, the profitability of equity capital of large and medium-sized enterprises in Ukraine as a whole (capital market return ratio) and the sphere of economic activity of «Transport» (investment assets return ratio) are used. The net profit and equity figures are shown in the Table 4 [9].

According to Table 4, the covariance of profitability (55.7) and market profitability dispersion (155.4) were determined. Thus, the Betta coefficient for investments in the sphere of economic activity «Transport» reaches

$$\beta = \frac{55.7}{155.4} = 0.358.$$

As the base rate, we used the rate of return on investments with a minimum risk – the average interest rate on long-term deposits of economic entities in 2017 was 14.3%.

The yield of the stock market at the current time is defined as the average yield of the stock index UX (index of Ukrainian shares) per one year (from 15.11.2016 to 15.11.2017). The index at period beginning was 791.11, at period end – 1261.62 [9]. The average annual rate of income is

$$R_m = \frac{1261.62}{791.11} \cdot 100 - 100 = 59.47 \text{ \%}.$$

Thus, the nominal discount rate before taxation is

$$R = R_b + \beta \cdot (R_m - R_b) = \\ = 14.3 + 0.358 \cdot (59.47 - 14.3) = 30.5 \text{ \%}.$$

Table 4

Determination of the return on equity

Year	Net financial result, mln. UAH		Average equity, mln. UAH		Equity at period end, mln. UAH		Return on equity, %	
	in Ukraine	transport	in Ukraine	transport	in Ukraine	transport	in Ukraine	transport
2016	13 324,4	6 622,533	1 790 507	727 082,3	1 806 908,5	729 340,6	0,74	0,91
2015	-373 516	-17 847,8	1 627 381	438 080,6	1 774 104,6	724 823,9	-22,95	-4,07
2014	-590 067	-22 591,6	1 715 516	165 346,2	1 480 658	151 337,3	-34,4	-13,66
2013	-22 839,7	-1 423,4	1 927 658	176 269,8	1 950 374,9	179 355,1	-1,18	-0,81
2012	35 067,3	3 127,7	1 745 612	179 525,3	1 904 940,2	173 184,5	2,01	1,74
2011	67 797,9	2 839,8	1 506 498	180 235,4	1 586 284,7	185 866	4,5	1,58
2010	13 906,1	1 348,7	1 348 125	169 027,3	1 426 711,6	174 604,7	1,03	0,8
2009	-37 131,1	4 889,5	1 201 571	155 846,4	1 269 537,7	163 449,8	-3,09	3,14
2008	-41 025,1	234,5	1 081 690	139 033,1	1 133 603,7	148 242,9	-3,79	0,17
2007	–	–	–	–	1 029 775,5	129 823,2	–	–

When forecasting the costs, the concept of base prices is used, so the real discount rate is used for discounting. The inflation rate is assumed to be 11% per year [9]. That is, the real discount rate reaches:

$$\frac{30.5 - 11}{1 + 0.11} = 17.6 \%$$

Thus, the main indices of the economic efficiency of modernization of the M62series locomotive are as follows:

– Net present value (formula (2))

$$NPV = 2162.7 \cdot \frac{1 - (1 + 0.176)^{-20}}{0.176} - 2145.6 = 9662 \text{ ths. UAH};$$

– Internal rate of return (3))

$$2162.7 \cdot \frac{1 - (1 + IRR)^{-20}}{IRR} - 2145.6 = 0;$$

$$IRR = 1.007;$$

– Profitability index (formula (4))

$$PI = \frac{2162.7 \cdot \frac{1 - (1 + 0.176)^{-20}}{0.176}}{2145.6} = 5.5 \text{ times};$$

– Static payback period is:

$$T_{pp} = \frac{2145.6}{2162.7} \cdot 12 = 11.9 \text{ months.}$$

The graph of accumulation of the net present value of the project is shown in Fig. 1

Originality and practical value

Taking into account the specifics of the type of locomotive work in freight traffic, we developed a method to determine the individual components of the average annual economic effect of modernization of the diesel locomotive WMB, which includes saving of oil costs, repairing and servicing the diesel locomotive WMB, as well as change of TVSB brass and saving fuel costs for traction.

The practical value of the work lies in the fact that on the basis of the above methodology and research results it is possible to determine the expediency of modernizing the locomotive taking into account the peculiarities of its operation.

Conclusions

It is clear from the calculations above that the net present value (*NPV*) of the project is 9662 thousand UAH, the internal rate of return (*IRR*) of the project is 100.7%, which exceeds the discount rate, the profitability index (*PI*) of the project is 5.5 times higher than 1. Schedule in Fig. 1 shows that the discount payback period of the project is 1.2

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

years (14.4 months), which is considerably less than the life cycle of investments.

Thus, the main criteria testify that the considered innovative project on modernization of M62

series locomotive provides a high level of cost effectiveness.

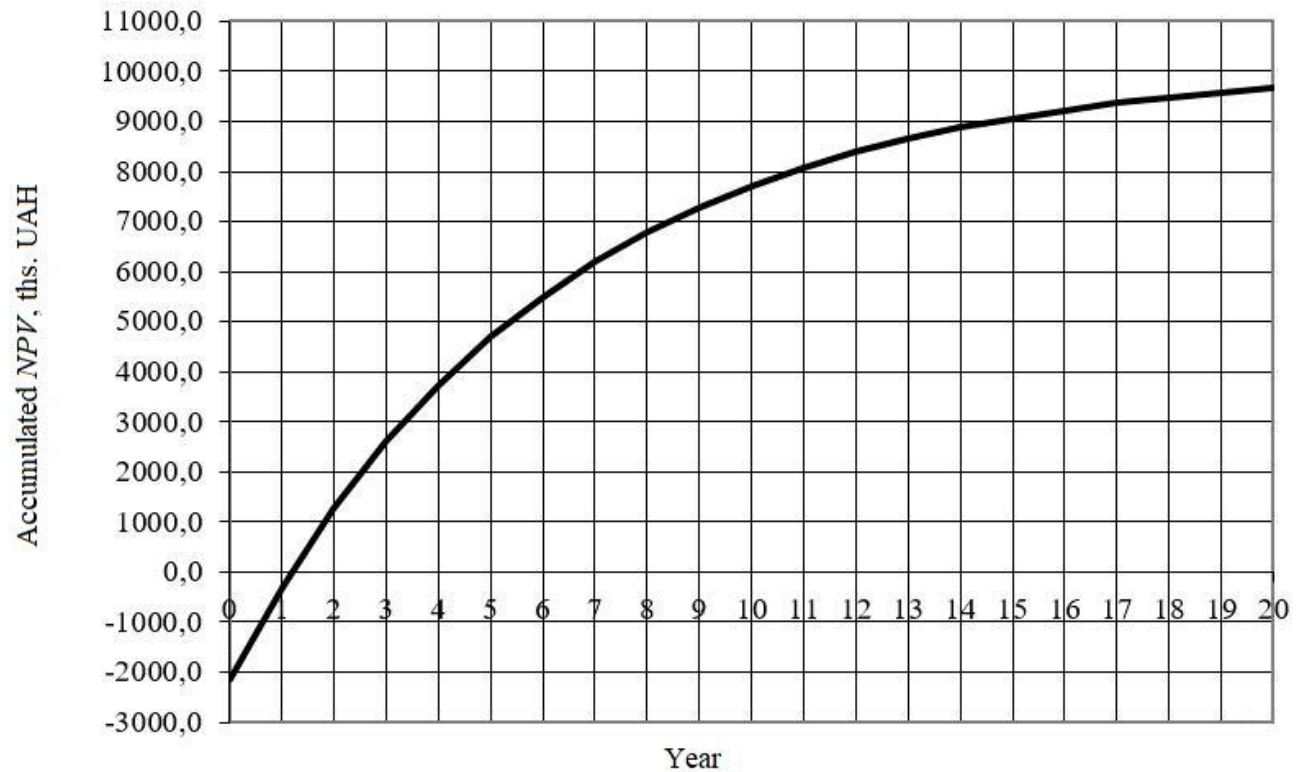


Fig. 1. Accumulation of net present value

At the same time, the value of the discounted investment payback period for modernization shows that it is expedient to conduct it if the remaining useful lifetime of the modernization object (M62 series diesel locomotive) is not less than 15 months.

The feasibility study is executed in the prices and standards of 2017 at the stage of development of the technical documentation for WMB modernization and should be clarified according to the results of their work in real operating conditions.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бланк, І. О. Інвестиційний менеджмент : підручник / І. О. Бланк. – Київ : Лібра, 2006. – 552 с.
2. Боднар, Б. Є. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина : підручник / Б. Є. Боднар, Є. Г. Нечаєв, Д. В. Бобир. – Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. – 284 с.
3. Дука, А. І. Теорія та практика інвестиційної діяльності. Інвестування / А. І. Дука. – Київ : Каравела, 2008. – 432 с.
4. Гненний, О. М. До питання оцінки та застосування вартості життєвого циклу продукції машинобудування / О. М. Гненний, А. Мохаммадреза // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 7–12. doi: 10.15802/pte.v0i12.95609
5. Ендовицкий, Д. А. Практикум по финансово-инвестиционному анализу. Ситуации. Методики. Решения : учеб. пособие / Д. А. Ендовицкий, Л. С. Коробейникова, С. Н. Коменденко ; под ред. Д. А. Ендовицкого. – Москва : КноРус, 2006. – 432 с.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Інструкція з використання мастильних матеріалів на тяговому рухомому складі залізниць України : ЦТ-0060 : затв. наказом Укрзалізниці від 21.04.2003 р. / М-во трансп. України. Держадміністрація залізничного транспорту України. Голов. управ. колійного госп-ва. – Київ : Девапта, 2003. – 55 с.
7. Лапицкий, В. Н. Новый этап в эксплуатации локомотивов: переход на моторно-осевые подшипники качения [Electronic resource] / В. Н. Лапицкий, А. Г. Пашнин // Информіо. – 2015. – Available at: <http://www.informio.ru/publications/id1894/Novyi-yetap-v-yekspluatacii-lokomotivov-perehod-na-motorno-osevye-podshipniki-kachenija> – Title from the screen. – Accessed : 02.04.2018.
8. Методы экономической оценки инвестиционных проектов на транспорте : учеб.-метод. пособие / Сост. Ю. Ф. Кулаев. – Киев : Транспорт Украины, 2001. – 182 с.
9. МОП качения на тепловозе ТЭМ18ДМ прошли проверку временем [Electronic resource] // и-Маш. – 2013. – Available at: http://www.i-mash.ru/news/nov_otrasl/32708-mop-kachenija-na-teplovoze-tjem18dm-proshli.html – Title from the screen. – Accessed : 02.04.2018.
10. Офіційний сайт Державної служби статистики України [Electronic resource]. – Available at: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/size.htm – Title from the screen. – Accessed : 02.04.2018.
11. Проект Програми Прогнозної оновлення рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» на період до 2021 року (станом на 21.11.2016). – Київ : Укрзалізниця, 2016. – 16 с.
12. Тарута, Д. В. Повышение долговечности моторно-осевых подшипников тягового электродвигателя тепловоза : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Дмитрий Викторович Тарута ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2005. – 178 с.
13. A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive / В. В. Carvalhaes, R. A. Rosa, M. A. D'Agosto, G. M. Ribeiro // Transportation Research. Part D: Transport and Environment. – 2017. – Vol. 51. – P. 29–42. doi: 10.1016/j.trd.2016.11.031
14. Bodnar, V. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways / V. Bodnar, A. Ochkasov, D. Bobyr // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2016. – № 7. – P. 109–114.
15. Shelley, S. Evaluating attitudes to safety leadership within rail construction projects / S. Shelley, B. Ryan, D. Golightly // Safety Science. – 2018. doi: 10.1016/j.ssci.2017.12.030

М. І. КАПИЦА^{1*}, О. М. ГНЕННИЙ^{2*}, Д. В. БОБИР^{3*}

^{1*}Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, ел. пошта m.i.kapitca@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

^{2*}Каф. «Економіка та менеджмент», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 80, ел. пошта olegnennij@gmail.com, ORCID 0000-0002-2944-5105

^{3*}Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, ел. пошта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ КОЛІСНО-МОТОРНИХ БЛОКІВ ТЕПЛОВОЗА З ВИКОРИСТАННЯМ МОТОРНО-ОСЬОВИХ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Мета. Використання моторно-осьових підшипників (МОП) кочення замість моторно-осьових підшипників ковзання є пріоритетним напрямком розвитку локомотивобудування й експлуатації наявних локомотивів. Вирішення завдань щодо впровадження на локомотивах колісно-моторних блоків (КМБ) із підшипниками кочення потребує пошуку альтернативних варіантів і нових технічних рішень. Метою статті є визначення доцільності переобладнання колісно-моторного блока тепловоза на підшипники кочення шляхом розрахунку життєвого циклу (*LCC*). **Методика.** Порядок і критерії оцінки економічної ефективності проектних (інвестиційних) пропозицій та інвестиційних проектів, затверджені постановою Кабінету Міністрів України, передбачають, що оцінку економічної ефективності інвестиційного проекту здійснюють за такими критеріями: чиста приведена вартість, внутрішня норма дохідності, дисконтований період окупності й індекс прибутковості. Використання зазначених критеріїв економічної ефективності повністю відповідає сучасним принципам, теоретико-методичним підходам і світовій практиці оцінки ефективності інвестицій. У роботі оцінка техніко-економічної ефективності модернізації колісно-моторного блока

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тепловоза проведена на основі розрахунку й порівняння наступних критеріїв – чистої приведеної вартості (*NPV*) модернізації, внутрішньої норми доходу (*IRR*), індексу дохідності (*PI*) й дисконтного терміну окупності. **Результати.** Виконані розрахунки значень основних критеріїв свідчать, що інноваційний проект із модернізації тепловоза забезпечує високий рівень економічної ефективності. При цьому величина дисконтованого терміну окупності інвестицій у модернізацію передбачає, що її проведення є доцільним, якщо залишковий ресурс строку корисного використання модернізованого тепловоза серії М62 не менший за 15 місяців. **Наукова новизна.** З урахуванням особливостей виду роботи тепловоза під час руху в складі вантажного поїзда розроблена методика з визначення окремих складових середньорічного економічного ефекту від модернізації колісно-моторного блока тепловоза. До них належать економія витрат на мастило, на ремонт й обслуговування колісно-моторного блока тепловоза, у тому числі заміну вкладишів МОП, та економія витрат на паливе для тяги поїздів. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють визначити доцільність модернізації тепловозів з урахуванням особливостей та умов їх роботи, а також специфіки модернізації.

Ключові слова: модернізація тепловоза; колісно-моторний блок; техніко-економічна ефективність; підшипники качення; життєвий цикл

М. И. КАПИЦА^{1*}, О. Н. ГНЕННЫЙ^{2*}, Д. В. БОБЫРЬ^{3*}

^{1*}Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, эл. почта m.i.kapitca@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

^{2*}Каф. «Экономика и менеджмент», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 80, эл. почта oleggnennij@gmail.com, ORCID 0000-0002-2944-5105

^{3*}Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, эл. почта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ ТЕПЛОВОЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Цель. Использование моторно-осевых подшипников (МОП) качения вместо моторно-осевых подшипников скольжения является приоритетным направлением развития локомотивостроения и эксплуатации имеющихся локомотивов. Решение задач по внедрению на локомотивах колесно-моторных блоков (КМБ) с подшипниками качения требует поиска альтернативных вариантов и новых технических решений. Целью статьи является определение целесообразности переоборудования колесно-моторного блока тепловоза на подшипники качения путем расчета жизненного цикла (ЛСС). **Методика.** Порядок и критерии оценки экономической эффективности проектных (инвестиционных) предложений и инвестиционных проектов, утвержденные постановлением Кабинета Министров Украины, предполагают, что оценка экономической эффективности инвестиционного проекта осуществляется по следующим критериям: чистая приведенная стоимость, внутренняя норма доходности, дисконтированный период окупаемости и индекс доходности. Использование указанных критериев экономической эффективности полностью соответствует современным принципам, теоретико-методическим подходам и мировой практике оценки эффективности инвестиций. В работе оценка технико-экономической эффективности модернизации колесно-моторного блока тепловоза проведена на основе расчета и сравнения следующих критериев – чистой приведенной стоимости (*NPV*) модернизации, внутренней нормы дохода (*IRR*), индекса доходности (*PI*) и дисконтного срока окупаемости. **Результаты.** Выполненные расчеты значений основных критериев свидетельствуют, что инновационный проект по модернизации тепловоза обеспечивает высокий уровень экономической эффективности. При этом величина дисконтированного срока окупаемости инвестиций в модернизацию предусматривает, что ее проведение целесообразно, если остаточный ресурс срока полезного использования модернизированного тепловоза серии М62 не менее 15 месяцев. **Научная новизна.** С учетом особенностей вида работы тепловоза во время движения в составе грузового поезда разработана методика по определению отдельных составляющих среднегодового экономического эффекта от модернизации колесно-моторного блока тепловоза. К ним относятся экономия расходов на смазку, на ремонт и обслуживание колесно-моторного

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

блока тепловоза, в том числе замену вкладышей МОТ, и экономия затрат на топливо для тяги поездов. **Практическая значимость.** Результаты работы позволяют определить целесообразность модернизации тепловозов с учетом особенностей и условий их работы, а также специфики модернизации.

Ключевые слова: модернизация тепловоза; колесно-моторный блок; технико-экономическая эффективность; подшипники качения; жизненный цикл

REFERENCES

- Blank, I. O. (2006). *Investytsiyni menedzhment : pidruchnyk*. Kyiv: Libra. (in Ukrainian)
- Bodnar, B. Y., Nechaiev, Y. G., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Ekipazhna chastyna: pidruchnyk*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
- Duka, A. I. (2008). *Teoriia ta praktyka investytsiinoi diialnosti. Investuvannia*. Kyiv: Karavella. (in Ukrainian)
- Hnennyj, O., & Mohammadreza, A. (2016). To the question of evaluation and use of life cycle cost of engineering product. *Problemi ekonomiki transportu: zbirnik naukovih prac' Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznicnogo transportu imeni akademika V. Lazarana, 12*, 7-12. doi: 10.15802/pte.v0i12.95609 (in Ukrainian)
- Yendovitskiy, D. A., Korobeinykova, L. S., & Komendenko, S. N. (2006). *Praktikum po finansovo-investitsionnomu analizu. Situatsii. Metodiki. Resheniya: uchebnoe posobie*. Moscow: KnoRus. (in Russian)
- Instruktsiia z vykorystannia mastylnykh materialiv na tiahovomu rukhomomu skladi zaliznyts Ukrainy: TsT-0060*. (2003). Kyiv: Devalta Ltd. (in Ukrainian)
- Lapitskiy, V. N., & Pashnin, A. G. (2015). Novyy etap v ekspluatatsii lokomotivov: perehod na motorno-osevye podshipniki kacheniya. *Informio*. Retrieved from <http://www.informio.ru/publications/id1894/Novyy-etap-v-yekspluatatsii-lokomotivov-perehod-na-motorno-osevye-podshipniki-kachenija> (in Ukrainian)
- Kulaev, Y. F. (2001). *Metody ekonomicheskoy otsenki investitsionnykh projektov na transporte. Uchebno-metodicheskoe posobie*. Kyiv: Transport Ukrainy. (in Russian)
- МОР качения на тепловозе ТЕМ18ДМ прошли проверку временем. (2013). *i-Mash*. Retrieved from http://www.i-mash.ru/news/nov_otrasl/32708-mop-kachenija-na-teploveze-tjem18dm-proshli.html (in Russian)
- Ofitsiyniy sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. (2018). Retrieved from http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/sze.htm
- Proekt Prohramy Prohnoznoi onovlennia rukhomoho skladu PAT «Ukrzaliznytsia» na period do 2021 roku (stanom na 21.11.2016)*. (2016). Kyiv : PAT «Ukrzaliznytsia».
- Taruta, D. V. (2005). *Povyshenie dolgovechnosti motorno-osevykh podshipnikov tyagovogo elektrodvigatelya teplovoza*. (Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk). Omsk State Transport University, Omsk. (in Russian)
- Carvalhaes, B. B., Rosa, R. A., D'Agosto, M. A., & Ribeiro, G. M. (2017). A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 51*, 29-42. doi: 10.1016/j.trd.2016.11.031 (in English)
- Bodnar, B., Ochkasov, A., & Bobyr, D. (2016). Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art, 7*, 109-114. (in English)
- Shelley, S., Ryan, B., & Golightly, D. (2018). Evaluating attitudes to safety leadership within rail construction projects. *Safety Science*. doi: 10.1016/j.ssci.2017.12.030 (in English)

Received: April 12, 2018

Accepted: July 25, 2018

UDC 629.463.027.23-027.45

O. G. REIDEMEISTER¹, O. A. SHYKUNOV^{2*}¹Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail reidemeister.a@gmail.com, ORCID 0000-0001-7490-7180^{2*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634**SENSITIVITY OF STRESSES TO THE FORCES ACTING ON THE CAST PARTS OF FREIGHT-CAR BOGIE**

Purpose. To determine the effect of the force components acting in the axle box and the central spring suspension on the stresses occurring in the side frame of the three-piece bogie. **Methodology.** To assess the effect of the forces acting on the side frame on the stresses in it, we developed a finite element model of the side frame. After that, we carried out an assessment of its stress-strain state under loading conditions corresponding to the I and III design modes. According to the results obtained, we determined the stress concentration points in the construction, which are selected as check ones for further studies. Also, as checkpoints we took the points corresponding to the sensor locations when estimating the stresses in the side frame during the tests. At the next stage, we applied unit loads in sequence at the interaction points of the side frame with the boxes and the central spring group. To obtain a more accurate result, the unit forces were balanced by the corresponding forces and moments of inertia. With each loading variant, tensors of stresses arising from the action of unit loads were obtained at checkpoints. On the basis of the stress tensors obtained, we determined the corresponding equivalent stresses – the sensitivity coefficients.

Findings. The paper determines the stress sensitivity coefficients in the three-piece bogie side frame to external loads acting on the side frame from the side of axle box and central spring group. Based on the results of the assessment of the coefficients obtained, we determined the forces having the greatest influence on individual sections of the side frame. We estimated the possibility of using the obtained results in optimizing the parameters of the bogie spring suspension to increase the strength and durability of the side frame. **Originality.** For the first time, the effect of individual components of the forces acting on the side frame on the stresses in it has been estimated.

Practical value. The obtained result can be used in the design and optimization of three-piece bogies, to improve the side frame durability. The stress tensors obtained can be used to estimate the effect of complex loading on the side frame strength and durability.

Key words: strength; side frame; three-piece bogie; durability; freight car

Introduction

The absence in the three-piece bogies of freight cars of devices preventing from falling onto the track its main supporting elements such as the bolster and the side frame sharply raise the reliability requirements imposed on these elements. However, a fairly large part of the freight train derailment at the current moment is caused precisely by defects in the cast parts of the bogies, namely, the side frame fractures.

The railway enterprises have been facing the problem of mass fracture of side frames since 2006 [3, 5, 16] and two main directions can be identified as the main possible causes.

The first one is low quality of casting. Work in this direction revealed two possible causes – hidden defects in casting [6] and non-compliance with

the established steel viscosity requirements KCV (-60°C) [2]. To solve these problems, the works are in progress to improve the casting technology – regulating the metal cooling by updating the moulding flasks or the design of the side frame itself. Besides, monitoring more strictly the quality of metal and casting methods by destructive and non-destructive controls.

The second possible cause of mass fractures is structural. In 2001, there was a transition from the I-section of the arch bar on the supra-box area to the box-like section [14]. It was suggested that the I-section of the side frame extension acted as an elastically deforming quencher of torque, which occurs during critical loosening of side frames relative to each other and the corresponding angular displacements of the set of wheels in the pedestal jaw opening. In other words, the I-section design was less rigid in the horizontal plane and had

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

a slightly loaded position – the I-section pedestal, which had a compensating effect of the bending moments of the set of wheels, and in abnormal operation modes, all defects in the side frame operation were visible. The solution to this problem is related to the development of methods for strengthening the side frame structure on the basis of calculations and tests to determine its strength [7, 13, 15, 17, 23], reliability, as well as the dynamic characteristics of the car as a whole [4, 8, 9, 16, 19, 21, 22].

Possible solutions are attempts to create welded structures of side frames [1, 11]. This solution, although it will eliminate the problems of casting, however raises many questions related to the reliability of welded joints.

To increase the reliability of the bogie cast parts, it is also possible to consider the possibility, at the design stage, of the influence of the spring suspension parameters on the stresses arising in the parts.

Purpose

To determine the effect of the force components acting in the axle box and the central spring suspension on the stresses occurring in the side frame of the three-piece bogie.

Methodology

The sensitivity of the indicator σ to the value P_j (j – index that separates the considered quantity from the set of values P_i , which σ depends on) means the ratio of the change in the indicator $\Delta\sigma$ to the change in the argument ΔP_j ,

$$k_j^{(\sigma)} = \Delta\sigma / \Delta P_j \quad (1)$$

In the case of a linear dependence of the exponent on all arguments, this definition is unambiguous in the sense that the sensitivity value $k_j^{(\sigma)}$ does not depend on the fact at which values of the arguments the indicator σ was calculated, as well as on the selected increment ΔP_j . In the general case it is necessary somehow to characterize the totality of the values $k_j^{(\sigma)}$ in a compact form. It is common to use the Morris method for this purpose [20], which consists in the fact that the sensitivity values

are calculated at random points in the domain of definition with specially chosen increments of arguments (to reduce the amount of calculations), and then the mathematical expectation $E[k_j^{(\sigma)}]$ and the $E[k_j^{(\sigma)}]$ mean-square deviation of the sensitivities $\sigma[k_j^{(\sigma)}]$ are analysed. Fulfilment of condition

$$|E[k_j^{(\sigma)}]| < 2\sigma[k_j^{(\sigma)}] \quad (2)$$

indicates a substantially nonlinear character of the dependence.

Since the dependence of the stress tensor components on the loads is linear, and the change in the parameters of the running parts causes a relatively small change in the loads, the nonlinearities (in determining the equivalent stresses and the number of cycles before the appearance of fracture) can hardly be regarded as essential, which eliminates the need to apply more sophisticated methods of sensitivity analysis such as Sobol's indices [18].

Stresses that arise in the bogie side frame under the action of a static load are shown in Figure 1. The heavily loaded areas near the lower corner of the central spring opening, on the lower side frame member and at the point R55 of the pedestal jaw opening are clearly visible. The stress levels in these places for various combinations of loads are given in Table 1 and approach the maximum permissible values for 20GL steel. The I calculation mode corresponds to the loading variants a and b, and III to c...f. Also, the stress concentration is noticeable in the corners of the process window (101 MPa) and the upper corners of the central spring opening (114 MPa).

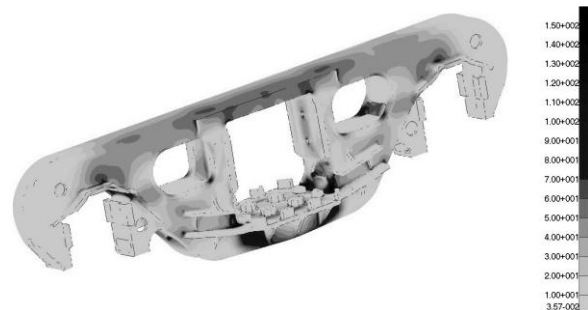


Fig. 1. Stress distribution in side frame model for the III-design mode, MPa.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The stress concentration at these points is expected from the point of view of the geometry of the model. Also these points are checkpoints according to [12].

Table 1

Maximum stresses in the bogie side frame, MPa

Loading variant	Place of occurrence	Permissible values	Estimated value	Checkpoints
a	Lower corners of the central spring opening	250	240	6, 7, 27
b	Vertical pedestal roof	250	235	14, 15,
c	Lower corners of the central spring opening	140	132	6, 7, 27
d	Vertical pedestal roof	140	137	14, 15,
e	Vertical pedestal roof	140	139	14, 15,
f	Lower corners of the central spring opening	140	131	6, 7, 27

Taking into account the obtained results, the points shown in Figure 2 were chosen to estimate the stressed state of the side frame. Their total number is 43, they are located in the middle of the lower side frame member (1-5, 18, 19, 25), in the upper (8, 9) and the lower (6, 7, 26, 27) corners of the central opening for spring suspension, in the opening between the diagonal tension member and the column (10-13), in the inner corner of the pedestal opening (14, 15), in the middle (20-24) and the cantilever part (16, 17) of the arch bar. The points located symmetrically are not shown in Fig. 2. And they are assigned with the numbers 4'... 27'.

The side frame perceives the forces from the central spring suspension and the axle box. To assess the effect of these forces on the stresses arising in the side frame, we sequentially determined the stresses from unit forces acting in three directions at the appropriate places. To balance the action of unit forces on the side frame, we applied inertia forces and a moment of inertia correspond-

ing to the acting forces. The points of application of unit forces and the direction of the local coordinate axes are shown in Figure 3

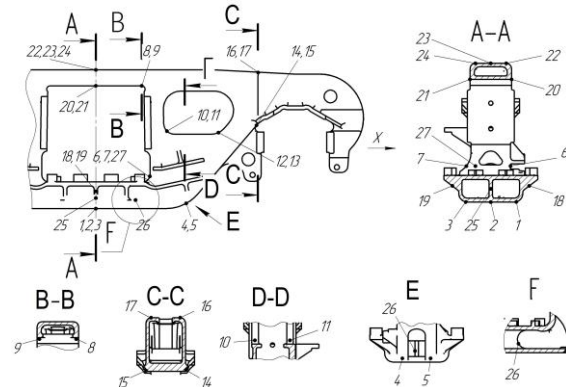


Fig. 2. Checkpoints

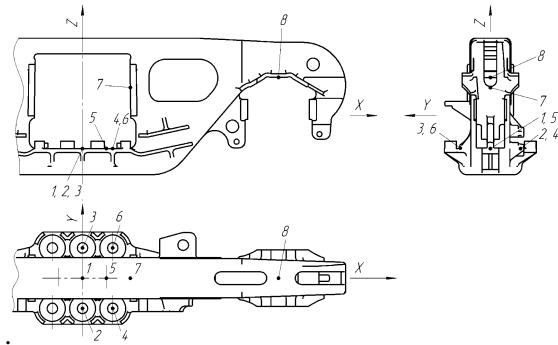


Fig. 3. Points of application of unit forces

Findings

As a result of the calculation, we obtained the tensors of stresses arising from the action of unit loads at the side frame checkpoints. On the basis of the obtained stress components, the corresponding equivalent stresses arising from the action of unit loads, the sensitivity coefficients, were calculated. The intensity of the effect of unit forces on the stresses at the points of the finite element model is shown in Fig. 4.

In Figure 4, the intensity of the shading of individual cells characterizes the degree of the force effect on equivalent stresses at the point of the model.

Analyzing the results of the calculation, we can conclude that the points 6, 8, 9 and symmetrical 6', 8' and 9' - the lower and upper corners of the central spring opening – are the most sensitive to changes in the external load, up to 1.204 MPa/kN. Point 26, strengthening rib in the lower member, is sensitive to the vertical load from the sub-key spring – 1.054 MPa/kN.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

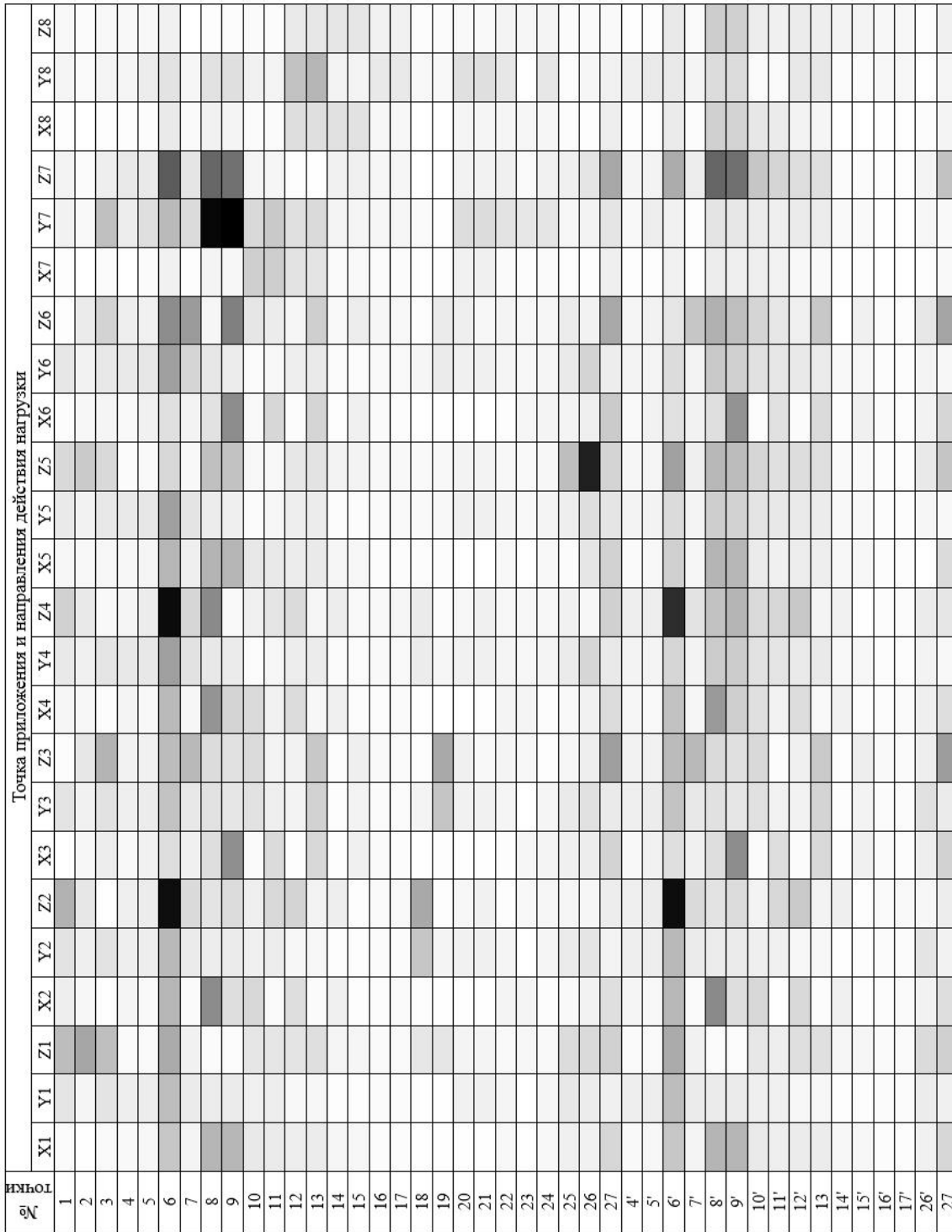


Fig. 4 .The intensity of the effect of unit forces on the stresses at the finite element model points

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The points located on the lower member (p. 1 – 3, 18, 19, 25), the lower corner of the central spring opening (p. 6, 7, 27) are sensitive to vertical loads acting on the central opening roof, the sensitivity factor is 0.411 MPa/kN and 1.154 MPa/kN respectively, and points 6, 7, 27 are also sensitive to vertical loads from the friction key – up to 0.772 MPa/kN. The transition from the lower member to the diagonal tension member (p. 4, 5) is almost equally sensitive to all loading variants except the longitudinal forces in the pedestal opening and from the action of the friction keys – up to 0.156 MPa/kN. The upper corner of the central spring opening (p. 8, 9) is sensitive to vertical and transverse loads from the action of the friction key – up to 1.204 MPa/kN. The arch bar in the middle part (p. 20–24) is more sensitive to the transverse loads acting from the vibration dampers and in the axle box – up to 0.166 MPa/kN. For points located in the process window area (p. 10 – 13) it is quite difficult to determine a specific group of forces that exert significant influence, since this area experiences a complex loading – up to 0.348 MPa/kN.

The inner corner of the pedestal opening (p. 14, 15) is mostly influenced by longitudinal and vertical forces from the nearest pedestal opening – up to 0.143 MPa/kN. The arch bar in the pedestal opening area (p. 16, 17) is mostly influenced by the forces in the places of vertical and transverse axle box intersections as well – up to 0.109 MPa/kN, the influence of the remaining loads is less approximately twofold.

Thus, to reduce, for example, the stresses in the lower corners of the pedestal opening (p. 6, 7, 27) by 5% (6.95 MPa, III design mode), it is necessary to reduce the vertical load on the central spring opening by 19.64 kN (average sensitivity coefficient is 0.35 MPa/kN). To reduce stresses in the inner corner of the pedestal opening (p. 14, 15) by 5%, it is necessary to reduce the level of longitudinal or vertical load components in the axle box by 52 MPa (average sensitivity coefficient is 0.132 MPa/kN). Reducing the load in this range

can be difficult; therefore, along with changes in the parameters of the spring sets, it is necessary to provide for an increase in the strength of the structure due to local reinforcement.

In operation, static forces act on the side frame from the car gross weight – about 220 kN with an axial load of 23.5 tons per axle and the dynamic forces arising from the movement of the car can be from 50% to 80% of the static load [10]. Reduction of static loads is not advisable, since their main component is the load-carrying capacity of the car. Dynamic loads, the magnitude of which can reach up to 176 kN, can be reduced through the use of rational parameters of spring suspension and the structure as a whole. At the same time, a decrease in the dynamic component of the loads acting on the side frame by only 5% – 8.8 kN, can lead to a decrease in the stress level in the side frame by 1.37–10.60 MPa. This decrease is not significant in evaluating the strength of the structure, however, in assessing its durability, reducing the dynamic load amplitude by 5% will cause an increase in longevity by 20% (fatigue curve index 4).

Originality and practical value

For the first time, the effect of forces acting on the three-piece bogie side frame on the stress level arising in it has been estimated.

The obtained sensitivity factors can be used to optimize the parameters of the freight car bogie for increase of durability of its details.

The stress tensors obtained can be used to estimate the effect of complex loading on the side frame strength and durability.

Conclusions

We determined stress sensitivity coefficients on the certain sections of the three-piece bogie side frame to external loads acting on the side frame from the side of the pedestal and spring openings. The stress tensors obtained can be used to estimate the effect of complex loading on the side frame strength and durability.

LIST OF REFERNECE LINKS

1. Богатов, А. А. О повышении служебных характеристик боковой рамы тележки грузового вагона / А. А. Богатов, Р. А. Ильиных // Вестник ВНИИЖТ. – 2010. – № 6. – С. 42–44.
2. Волченков, Н. Стальное литье и методы повышения качества [Electronic resource] / Н. Волченков, В. Моисеенков, Е. Сургаева // ИИС «Металлоснабжение и сбыт». – 2011. – Available at: <http://www.metainfo.ru/ru/news/49443> – Title from the screen. – Accessed : 18.07.2018.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Демин, Ю. В. Улучшение технических характеристик тележек грузовых вагонов / Ю. В. Демин, Г. Д. Кочмала // Заліз. трансп. України. – 1999. – № 3. – С. 26–29.
4. Динамика грузовых вагонов с учетом поперечного смещения тележек / Н. И. Луханин, С. В. Мямлин, Л. А. Недужая, А. А. Швец // Зб. наук. пр. Донец. ін-ту заліз. трансп. – Донецьк, 2012. – № 29. – С. 234–241.
5. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). – Чинний від 2014–01–02. – Київ : УкрНДНЦ, 2017. – 162 с.
6. Ишмухамметов, Ф. Рамы грузовых тележек продолжают ломаться [Electronic resource] / Ф. Ишмухамметов // Коммерсант.ru. – Available at: <http://www.kommersant.ru/doc/2421946> – Title from the screen. – Accessed : 18.07.2018.
7. Конькова, Т. Е. О путях повышения эксплуатационной надежности стальных литых деталей тележек грузовых вагонов / Т. Е. Конькова, В. Б. Беловодский, А. В. Великанов // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – № 1. – С. 22–26.
8. Манашкин, Л. А. Об измерении вертикальных сил в тележках грузовых вагонов / Л. А. Манашкин, С. В. Мямлин, Е. А. Письменный // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 5. – С. 132–135.
9. Мурадян, Л. А. Залежність величини зносу пари тертя «п'ятник–підп'ятник» від пробігу вантажного вагона / Л. А. Мурадян, Д. О. Подосьонов, В. Ю. Шапошник // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 61–69. doi: 10.15802/stp2017/118136
10. Мурадян, Л. А. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту заліз. трансп. – Харків, 2015. – Вип. 157. – С. 119–128.
11. Перспективы создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона / О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, И. В. Мирзов, А. Д. Пустовой // Автоматическая сварка. – 2014. – № 3. – С. 36–42.
12. РД 24.050.37.95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытания на прочность и ходовые качества. – Москва : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
13. Рейдемейстер, А. Г. Способы увеличения прочности боковых рам трехэлементных тележек / А. Г. Рейдемейстер, А. А. Шикунов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 141–149. doi: 10.15802/stp2015/55351
14. Савчук, В. Б. Радиус излома на Совете главных конструкторов / В. Б. Савчук, Г. М. Зобов // Техника железных дорог. – 2013. – № 2 (22). – С. 32–36.
15. Ушкалов, В. Ф. Определение состава и уровня сил, действующих на консольную часть боковой рамы в процессе эксплуатации грузового вагона / В. Ф. Ушкалов, Н. В. Безрукавый // Техническая механика. – 2016. – № 2. – С. 85–90.
16. Шупелов, Н. Анализ изломов боковых рам (2006÷2014 гг.) [Electronic resource] / Н. Шупелов // MyShared. – Available at: <http://www.myshared.ru/slide/992141> – Title from the screen. – Accessed : 18.07.2018.
17. A new lever-type variable friction damper for freight bogies used in heavy haul railway / Ximing Xu, Maohai Fu, Zhaoxia Xu, Zhongyi Chen // Journal of Modern Transportation. – 2016. – Vol. 24. – Iss. 3. – P. 159–165. doi: 10.1007/s40534-016-0116-4
18. Global sensitivity analysis. The primer / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola. – Chichester, West Sussex, England : John Wiley & Sons, 2008. – 292 p.
19. Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars / S. Myamlin, O. Lunys, L. Neduzha, O. Kyryl'chuk // Transport Means : Proc. of 21st Intern. Scientific Conf. (20–22nd September, 2017). – Kaunas, 2017. – P. 973–976.
20. Morris, M. D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments / Max D. Morris // Technometrics. – 1991. – Vol. 33, No. 2. – P. 161–174.
21. Prospects for the Use of Gondola Cars on Bogies of Model ZK1 in the Organization of Heavy Freight Traffic in the Republic of Kazakhstan / S. Abdullayev, G. Imasheva, N. Tomkurzina, N. Adilova, G. Bakyt // Mechanics. – 2018. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 32–36. doi: 10.5755/j01.mech.24.1.17710
22. Reidemeister, O. H. Method of Constructing the Dynamic Model of Movement of the Multi-Mass System / O. H. Reidemeister, V. O. Kalashnyk, O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 5 (71). – С. 99–106. doi: 10.15802/stp2017/112921
23. Shykunov, O. A. Three-element bogie side frame strength / O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 183–193. doi: 10.15802/stp2017/92535

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР¹, О. А. ШИКУНОВ^{2*}

¹Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровській національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта reidemeister.a@gmail.com, ORCID 0000-0001-7490-7180

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровській національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

ЧУТЛИВІСТЬ НАПРУЖЕНЬ ДО СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ЛИТІ ДЕТАЛІ ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. Визначити вплив компонентів сил, які діють у буксовому вузлі та центральному ресорному ступені підвішування, на напруження, що виникають у бічній рамі трьохелементного візка, – основна мета наукової роботи. **Методика.** Для оцінки впливу сил на виникнення напруги в бічній рамі була розроблена її кінцево-елементна модель. Після цього проведена оцінка напружено-деформованого стану бічної рами при варіантах навантаження, відповідних I і III розрахунковим режимам. За отриманими результатами визначені точки концентрації напружень у конструкціях, які обрані в якості контрольних для подальших досліджень. Також в якості контрольних прийняті точки, що відповідають місцям встановлення датчиків при оцінці напружень у бічній рамі під час випробувань. На наступному етапі послідовно прикладалися одиночні навантаження в місцях взаємодії бічної рами з буксами і центральним ресорним комплектом. Для отримання більш точного результату одиночні сили були врівноважені відповідними силами та моментами інерції. При кожному варіанті навантаження в контрольних точках були отримані тензори напружень, що виникають під дією одиночних навантажень. На основі отриманих тензорів напружень визначалися відповідні еквівалентні напруження – коефіцієнти чутливості. **Результати.** У роботі визначені коефіцієнти чутливості напруг до зовнішніх навантажень у бічній рамі трьохелементного візка. Зовнішні навантаження діють на раму з боку букси і центрального ресорного комплексу. За результатами оцінки отриманих коефіцієнтів визначені сили, що чинять найбільший вплив на окремі ділянки бічної рами. **Наукова новизна.** Вперше наведена оцінка впливу окремих компонентів сил, що діють на бічну раму, на напруги в ній. Подана оцінка можливості застосування отриманих результатів під час оптимізації параметрів ресорного підвішування візка для збільшення міцності й довговічності бічної рами. **Практична значимість.** Отриманий результат може бути використаний під час проектування й оптимізації трьохелементного візка, для підвищення довговічності бічних рам. Отримані тензори напружень можуть бути використані для оцінки впливу складного навантаження на міцність і довговічність бічної рами.

Ключові слова: міцність; бічна рама; трьохелементний візок; довговічність; вантажний вагон

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР¹, А. А. ШИКУНОВ^{2*}

¹Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта reidemeister.a@gmail.com, ORCID 0000-0001-7490-7180

^{2*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ К СИЛАМ, ДЕЙСТВУЮЩИМ НА ЛИТЫЕ ДЕТАЛИ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. Определить влияние компонентов сил, действующих в буксовом узле и центральной ресорной ступени подвешивания, на напряжения, возникающие в боковой раме трёхэлементной тележки грузового вагона, – основная цель научной работы. **Методика.** Для оценки влияния сил на возникновение напряжения в боковой раме была разработана ее конечно-элементная модель. После этого проведена оценка напряженно-деформированного состояния боковой рамы при вариантах нагружения, соответствующих I и III расчетным

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

режимам. По полученным результатам определены точки концентрации напряжений в конструкции, которые выбраны в качестве контрольных для дальнейших исследований. Также в качестве контрольных приняты точки, соответствующие местам установки датчиков при оценке напряжений в боковой раме во время испытаний. На следующем этапе последовательно прикладывались единичные нагрузки в местах взаимодействия боковой рамы с буксами и центральным рессорным комплектом. Для получения более точного результата единичные силы были уравновешены соответствующими силами и моментами инерции. При каждом варианте нагружения в контрольных точках были получены тензоры напряжений, возникающие от действия единичных нагрузок. На основе полученных тензоров напряжений определялись соответствующие эквивалентные напряжения – коэффициенты чувствительности. **Результаты.** В работе определены коэффициенты чувствительности напряжений к внешним нагрузкам в боковой раме трехэлементной тележки. Внешние нагрузки действуют на раму со стороны буксы и центрального рессорного комплекта. По результатам оценки полученных коэффициентов определены силы, оказывающие наибольшее влияние на отдельные участки боковой рамы. **Научная новизна.** Впервые проведена оценка влияния отдельных компонентов сил, действующих на боковую раму, на напряжения в ней. Дана оценка возможности применения полученных результатов при оптимизации параметров рессорного подвешивания тележки для увеличения прочности и долговечности боковой рамы. **Практическая значимость.** Полученный результат может быть использован при проектировании и оптимизации трехэлементных тележек, для повышения долговечности боковых рам. Полученные тензоры напряжений могут быть использованы для оценки влияния сложного нагружения на прочность и долговечность боковой рамы.

Ключевые слова: прочность; боковая рама; трехэлементная тележка; долговечность; грузовой вагон

REFERENCES

1. Bogatov, A. A., & Pinykh, R. A. (2010). O povyshenii sluzhebnykh kharakteristik bokovoy ramy telezhki gruzovogo vagona. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 6, 42-44. (in Russian)
2. Volchenkov, N., Moiseenkov, V., & Surgaeva, Ye. (2011). Stalnoe lite i metody povysheniya kachestva. *IIS Metallosnabzhenie i sbyt*. Retrieved from <http://www.metalinfo.ru/ru/news/49443> (in Russian)
3. Demin, Yu. V., & Kochmala, G. D. (1999). Uluchshenie tekhnicheskikh kharakteristik telezhek gruzovykh vagonov. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 3, 26-29. (in Russian)
4. Lukhanin, N. I., Myamlin, S. V., Neduzhaya, L. A., & Shvets, A. A. (2012). Dinamika gruzovykh vagonov s uchetom poperechnogo smeshcheniya telezhek. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 29, 234-241. (in Russian)
5. Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrakhunkiv ta proektuvannya novikh i modernizo-vanikh vagoniv koliï 1520 mm (nesamokhidnikh), 162 DSTU 7598:2014 (2017). (in Ukrainian)
6. Ishmukhammetov, F. (2014). Ramy gruzovykh telezhek prodolzhayut lomatsya. *Kommersant.ru*. Retrieved from <http://www.kommersant.ru/doc/2421946> (in Russian)
7. Konkova, T. Ye., Belovodskiy, V. B., & Velikanov, A. V. (2009). O putyakh povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti stalnykh litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 1, 22-26. (in Russian)
8. Manashkin, L. A., Myamlin, S. V., & Pismenny, Y. A. (2004). About measuring vertical forces in freight car bogies. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 5, 132-135. (in Russian)
9. Muradyan, L. A., Podosonov, D. O., & Shaposhnik, V. Yu. (2017). Theoretical dependence of wear value of friction pair «center plate – center pad» on a freight car mileage. *Science and Transport Progress*, 6(72), 61-69. doi: 10.15802/stp2017/118136 (in Ukrainian)
10. Muradyan, L. A., & Shaposhnik, V. Yu. (2015). Question of Plans at Trials Reliability of Mechanical Systems. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 157, 119-128. (in Russian)
11. Makhnenko, O. V., Saprykina, G. Yu., Mirzov, I. V., & Pustovoy, A. D. (2014). Perspektivy sozdaniya svarnykh konstruktiv nesushchikh elementov telezhki gruzovogo vagona. *Avtomaticheskaya svarka*, 3, 36-42. (in Russian)
12. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniya na prochnost i khodovye kachestva, 101 RD 24.050.37.95 (1995). (in Russian)
13. Reydemeyer, A. G., & Shikunov, A. A. (2015). Strength increase methods of the side frame of the bogie in three-piece truck. *Science and Transport Progress*, 5(59), 141-149. doi: 10.15802/stp2015/55351 (in Russian)
14. Savchuk, V. B., & Zobov, G. M. (2013). Radius izloma na Sovete glavnykh konstruktorov. *Tekhnika zheleznykh dorog*, 2(22), 32-36. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. Ushkalov, V. F., & Bezrukavyy, N. V. (2016). Opredelenie sostava i urovnya sil, deystvuyushchikh na konsolnyuyu chast bokovoy ramy v protsesse ekspluatatsii gruzovogo vagona. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2, 85-90. (in Russian)
16. Shupelov, N. (2015). Analiz izlomov bokovykh ram (2006÷2014 gg.). *MyShared*. Retrieved from <http://www.myshared.ru/slide/992141> (in Russian)
17. Xu, X., Fu, M., Xu, Z., & Chen, Z. (2016). A new lever-type variable friction damper for freight bogies used in heavy haul railway. *Journal of Modern Transportation*, 24(3), 159-165. doi: 10.1007/s40534-016-0116-4 (in English)
18. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis. The primer*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons. (in English)
19. Myamlin, S., Lunys, O., Neduzha, L., & Kyryl'chuk, O. (2017). Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars. *Transport Means: Proc. of 21st Intern. Scientific Conf, 20-22 September, 2017, Kaunas*, 973-976. (in English)
20. Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174. (in English)
21. Imasheva, G., Abdullayev, S., Tokmurzina, N., Adilova, N., & Bakyt, G. (2018). Prospects for the Use of Gondola Cars on Bogies of Model ZK1 in the Organization of Heavy Freight Traffic in the Republic of Kazakhstan. *Mechanics*, 24(1), 32–36. doi: 10.5755/j01.mech.24.1.17710 (in English)
22. Reidemeister, O. H., Kalashnyk, V. O., & Shykunov, O. A. (2017). Method of Constructing the Dynamic Model of Movement of the Multi-Mass System. *Science and Transport Progress*, 5(71), 99-106. doi: 10.15802/stp2017/112921 (in English)
23. Shykunov, O. A. (2017). Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*, 1(67), 183-193. doi: 10.15802/stp2017/92535 (in English)

Received: April 10, 2018

Accepted: July 17, 2018

UDC 629.463.083-049.6V. Y. SHAPOSHNYK^{1*}

^{1*}Dep. «Cars and Cars Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

THEORETICAL STUDIES ON THE PROCESS OF CHANGE OF THE TECHNICAL CONDITION OF FREIGHT CARS IN OPERATION

Purpose. The scientific work is intended to investigate the technical condition of freight cars during their operation. The said purpose involves solving the following tasks: 1) to describe the technical condition of a freight car during the maintenance and repair period; 2) to determine the dependences of the probability of a freight car being in working condition during the life cycle; 3) to specify the expression for the technical availability ratio of the car fleet. **Methodology.** To achieve the purpose, the author examined the methodological approaches to the definition of various stages of the freight car life cycle. The system of change and transition of the technical condition of the freight car is described using differential equations. **Findings.** In the case of an unstable process of changing the technical condition of a freight car, the probabilistic characteristic of the appropriate life cycle stage depends on the amount of time. The intensity of the input and output flows are correlated with each other, taking into account the probability of a freight car being at the appropriate stage of its life cycle. **Originality.** Transitions from one car life cycle to another occur in discrete steps, that is, such transitions are characterized by a random process. The probability of a freight car being at the appropriate life cycle is determined by its prior technical condition. The total value of the set of all possible conditions consists of the Markov chain for random processes with random states and a continuous flow of time. The study resulted in obtaining, for the first time, of the dependence of the probability of a freight car being in working condition during the life cycle. **Practical value.** On the basis of the obtained definition for the probability of the freight car being in working condition the expression for the technical availability ratio of the car fleet was clarified.

Keywords: freight car; reliability; life cycle of the car; technical condition diagram; technical availability ratio; car fleet

Introduction

The main task of rail transport is to ensure uninterrupted transportation process, the mandatory condition of which is the safe railway operation [9, 17]. Successful implementation of the tasks facing the railway needs to improve the technical level of rolling stock, the introduction of modern high-efficient constructive solutions, materials and technologies [12, 16, 18, 19]. In order to maintain a high technical level of the car fleet, it is necessary to introduce the modern technologies for renewal and increase of wear resistance of parts, improvement of the maintenance system of cars in operation [4, 8, 10, 13, 15]. With the introduction of new information technologies that enable the automatic identification of cars and their individual parts, even the normal operation of the car can be viewed as a stand for reliability testing [6, 11]. The analysis of publications on this problem indicates the need for theoretical studies of the process of

changing the technical condition of freight cars in operation [1, 7, 14].

Purpose

The main purpose of the work is to investigate the process of changing the technical condition of freight cars in operation. To achieve it, it is necessary: 1) to describe the technical condition of the freight car during maintenance and repair; 2) to determine the dependences of the probability of a freight car being in working condition during the life cycle; 3) to specify the expression for the technical availability ratio of the car fleet.

Methodology

The freight car during its lifetime may be at different stages of the life cycle:

– in the initial state (test sample, which undergoes acceptance tests and has a trial run);

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- in under-control operation;
- in good working condition;
- on maintenance (M, Mc-1, Mc-2);
- on roundhouse servicing (RS);
- on overall repairs (OR, OR with life extension);
- on storage;
- in a good non-working condition (idle).

Transitions from one life cycle to another occur in discrete steps, that is, such transitions are characterized by a random process [2]. The probability of a freight car being at the appropriate life cycle is determined by its prior technical condition. The total value of the set of all possible conditions con-

sists of the Markov chain for random processes with random states and a continuous flow of time. In this case, there is a sequence of dependent technical states S_n to other S_k occurs through the actions of the corresponding streams of events. Such events are failure or restoration.

Let us denote the failure flow intensity rate as λ , and the restoration flow intensity rate of the technical condition of the freight car as μ .

Characteristics of the corresponding technical condition of the freight car at a certain stage of the life cycle are given in Table 1.

Table 1

Characteristics of the technical condition of the freight car during the life cycle

Stage of the relevant life cycle	Designation of technical condition, S	Failure intensity value, λ	Restoration intensity rate of the technical condition, μ
Starting (initial) state	S_o	–	–
Under-control operation	S_{con}	–	μ_{con}
Good working condition	S_w	–	–
On maintenance	S_M	λ_M	μ_M
On maintenance Mc-1	S_{Mc-1}	λ_{Mc-1}	μ_{Mc-1}
On maintenance Mc-2	S_{Mc-2}	λ_{Mc-2}	μ_{Mc-2}
On roundhouse servicing	S_{RS}	λ_{RS}	μ_{RS}
On OR	S_{OR}	S_{OR}	μ_{OR}
On OR with life extension	S_{ORL}	λ_{ORL}	μ_{ORL}
On storage	S_{st}	λ_{st}	μ_{st}
Idle state	S_i	λ_i	μ_i

For the given technical conditions of the life cycle of a freight car it is possible to propose a marked diagram with corresponding transitions (Fig. 1).

The indication of the technical condition of the freight car is given in the circles, and the transitions themselves from one condition to another are indicated by arrows specifying the intensity of the failure or restoration flows. Each technical condition of the freight car is characterized by the corresponding probability:

- P_o – probability rate of freight car being in its original condition (a test specimen undergoing acceptance tests and having a trial run);
- P_w – probability rate of freight car being in working condition;
- P_M – probability rate of carrying out maintenance of the freight car;
- P_{Mc-1} – probability rate of carrying Mc-1 of the freight car;

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- P_{Mc-2} – probability rate of carrying $Mc-2$ of the freight car;
- P_{con} – probability rate of being under the control of operation;
- P_{RS} – probability rate of conducting RS of the freight car;
- P_{OR} – probability rate of carrying out OR of the freight car;

- P_{ORL} – probability rate of carrying out ORL of the freight car;
- P_{st} – probability rate of the working condition of the freight car during storage;
- P_i – probability rate of the working condition of the freight car at idle.

The probability flow of the technical condition of the freight car will be equal to the product: $P_i\lambda_i, P_i\mu_i$.

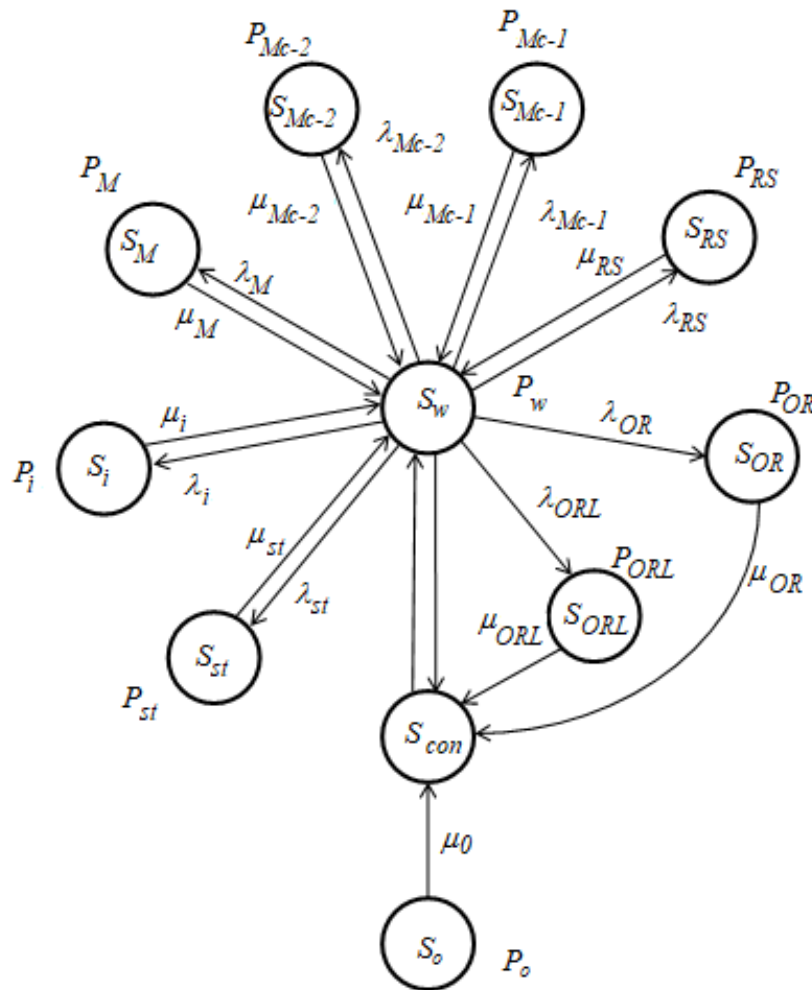


Fig. 1. Freight car technical condition diagram

Findings

In the case of an unstable process of changing the technical condition of a freight car, the probabilistic characteristic of the appropriate life cycle stage depends on the amount of time, while the intensity of the input and output flows are correlat-

ed with each other, taking into account the probability of a freight car being at the appropriate stage of its life cycle.

The very system of change and transition of the technical condition of the freight car according to the diagram (Fig. 1) can be described by means of differential equations [3, 5]:

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\frac{dP_o(t)}{dt} = P_o(t) \mu_o; \quad (1) \quad -P_{con}(t) \lambda_{con}; \quad (8)$$

$$\frac{dP_{con}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{con} - P_{con}(t) \lambda_{con}; \quad (2) \quad \frac{dP_{st}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{st} - P_{st}(t) \lambda_{st}; \quad (9)$$

$$\frac{dP_M(t)}{dt} = P_w(t) \mu_M - P_M(t) \lambda_M; \quad (3) \quad \frac{dP_i(t)}{dt} = P_w(t) \mu_i - P_i(t) \lambda_i; \quad (10)$$

$$\frac{dP_{Mc-1}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{Mc-1} - P_{Mc-1}(t) \lambda_{Mc-1}; \quad (4)$$

$$\frac{dP_{Mc-2}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{Mc-2} - P_{Mc-2}(t) \lambda_{Mc-2}; \quad (5)$$

$$\frac{dP_{RS}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{RS} - P_{RS}(t) \lambda_{RS}; \quad (6)$$

$$\frac{dP_{OR}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{OR} + P_{con}(t) \mu_{con} - P_{con}(t) \lambda_{con}; \quad (7)$$

$$\frac{dP_{ORL}(t)}{dt} = P_w(t) \mu_{ORL} + P_{con}(t) \mu_{con} -$$

For the probability of freight car being in working condition, we use the following differential equation:

$$\begin{aligned} \frac{dP_w(t)}{dt} = & P_w(t) \mu_o + P_{con}(t) \mu_{con} + P_{OR}(t) (\mu_{OR} - \lambda_{OR}) + \\ & + P_{ORL}(t) (\mu_{ORL} - \lambda_{ORL}) + P_{RS}(t) (\mu_{RS} - \lambda_{RS}) + \\ & + P_M(t) (\mu_M - \lambda_M) + P_{Mc-1}(t) (\mu_{Mc-1} - \lambda_{Mc-1}) + \\ & + P_{Mc-2}(t) (\mu_{Mc-2} - \lambda_{Mc-2}) + P_{st}(t) (\mu_{st} - \lambda_{st}) + \\ & + P_i(t) (\mu_i - \lambda_i) \end{aligned} \quad (11)$$

If we solve the system of equations (1-11), we can find the probability of the freight car being in working condition (12):

$$\begin{aligned} P_w = & \frac{P_o \mu_o^2 t_o - P_{con} t_{con} (\mu_{con} \lambda_{con} - \mu_{or} \lambda_{con} + \lambda_{con} \lambda_{or} + \mu_{or} - \lambda_{or} + \\ & 2t_w - \mu_{con}^2 t_{con} - \mu_{or} t_{or} (\mu_{or} - \lambda_{or}) - \\ & + \lambda_{con} \lambda_{orl} - \mu_{orl} \lambda_{con} + \mu_{orl} - \lambda_{orl}) - \\ & - \mu_{orl} t_{orl} (\mu_{orl} - \lambda_{orl}) - \\ & - P_M \lambda_M t_M (\mu_M - \lambda_M) - P_{Mc-1} \lambda_{Mc-1} t_{Mc-1} (\mu_{Mc-1} - \lambda_{Mc-1}) - \\ & - \mu_M t_w (\mu_M - \lambda_M) - \mu_{Mc-1} t_w (\mu_{Mc-1} - \lambda_{Mc-1}) - \\ & - P_{Mc-2} \lambda_{Mc-2} t_{Mc-2} (\mu_{Mc-2} - \lambda_{Mc-2}) - P_{RS} \lambda_{RS} t_{RS} (\mu_{RS} - \lambda_{RS}) - \\ & - \mu_{Mc-2} t_w (\mu_{Mc-2} - \lambda_{Mc-2}) - \mu_{RS} t_w (\mu_{RS} - \lambda_{RS}) - \\ & - P_{st} \lambda_{st} t_{st} (\mu_{st} - \lambda_{st}) - P_i \lambda_i t_i (\mu_i - \lambda_i) \\ & - \mu_{st} t_w (\mu_{st} - \lambda_{st}) - \mu_i t_w (\mu_i - \lambda_i) \end{aligned} \quad (12)$$

Using the expression to find the probability of the freight car being in the working condition (12),

we can clarify for the expression for the technical availability ratio of the car fleet (13):

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\begin{aligned}
R_A = \frac{m}{m_{tot}} \sum_{i=1}^n \frac{P_{oi} \mu_{oi}^2 t_{oi} - P_{coni} t_{coni} (\mu_{coni} \lambda_{coni} - \mu_{ori} \lambda_{coni} +}{2 t_{wi} - \mu_{coni}^2 t_{coni} - \mu_{ori} t_{ori} (\mu_{ori} - \lambda_{ori}) -} \\
\frac{+ \lambda_{coni} \lambda_{ori} + \mu_{ori} - \lambda_{ori} + \lambda_{coni} \lambda_{orli} - \mu_{orli} \lambda_{coni} + \mu_{orli} - \lambda_{orli}) -}{- \mu_{orli} t_{orli} (\mu_{orli} - \lambda_{orli}) -} \\
\frac{- P_{Mi} \lambda_{Mi} t_{Mi} (\mu_{Mi} - \lambda_{Mi}) - P_{Mc-1i} \lambda_{Mc-1i} t_{Mc-1i} (\mu_{Mc-1i} - \lambda_{Mc-1i}) -}{- \mu_{Mi} t_{wi} (\mu_{Mi} - \lambda_{Mi}) - \mu_{Mc-1i} t_{wi} (\mu_{Mc-1i} - \lambda_{Mc-1i}) -} \\
\frac{- P_{Mc-2i} \lambda_{Mc-2i} t_{Mc-2i} (\mu_{Mc-2i} - \lambda_{Mc-2i}) - P_{RSi} \lambda_{RSi} t_{RSi} (\mu_{RSi} - \lambda_{RSi}) -}{- \mu_{Mc-2i} t_{wi} (\mu_{Mc-2i} - \lambda_{Mc-2i}) - \mu_{RSi} t_{wi} (\mu_{RSi} - \lambda_{RSi}) -} \\
\frac{- P_{sti} \lambda_{sti} t_{sti} (\mu_{sti} - \lambda_{sti}) - P_{ii} \lambda_{ii} t_{ii} (\mu_{ii} - \lambda_{ii})}{- \mu_{sti} t_{wi} (\mu_{sti} - \lambda_{sti}) - \mu_{ii} t_{wi} (\mu_{ii} - \lambda_{ii})}. \quad (13)
\end{aligned}$$

where m – the number of freight cars in good technical condition; i – the corresponding freight car; m_{tot} – total number of the car fleet units.

the probability of the freight car being in working condition the expression for the technical availability ratio of the car fleet was clarified.

Originality and practical value

Having formed the Markov chain for random processes of probability of the freight car being at a corresponding life cycle with random conditions and continuous flow of time, we for the first time obtained dependence of probability of the freight car being in the working condition during the life cycle. On the basis of the obtained definition for

Conclusions

The work considered change of technical condition of freight cars in operation occurs during the whole lifetime, and the technical condition can be in different stages of the life cycle. Transitions from one car life cycle to another occur in discrete steps, that is, such transitions are characterized by a random process.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Босов, А. А. Теоритические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог : монография / А. А. Босов, П. А. Лоза. – Днепропетровск : Дриант, 2015. – 252 с.
2. Бочаров, П. П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – Москва : Физматлит, 2005. – 296 с.
3. Булинский, А. В. Теория случайных процессов / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – Москва : Физматлит, 2005. – 408 с.
4. Дюргеров, Н. Г. Восстановление и повышение износостойкости деталей вагонов : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / Н. Г. Дюргеров, И. С. Морозкин, В. Н. Кротов. – Ростов н/Д, 2011. – 255 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы : [пер. с англ.] / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974. – 832 с.
6. Мурадян, Л. А. Автоматична ідентифікація окремих частин транспортного засобу при впровадженні нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Інформ.-керуючі системи на залізнич. трансп. – 2017. – № 4. – С. 44–50.
7. Мурадян, Л. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Мищенко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 169–179. doi: 10.15802/stp2016/61044

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Мурадян, Л. А. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, Д. А. Подосенов // Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 49–54.
9. Мямлин, В. В. Теоретические основы создания гибких поточных производств для ремонта подвижного состава : монография / В. В. Мямлин. – Днепропетровск : Стандарт-Сервис, 2014. – 380 с.
10. Мямлин, С. В. Определение стратегии технического обслуживания и ремонта вагонной техники / С. В. Мямлин, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VII-ой междунар. науч.-техн. конф. (29 марта – 1 апр. 2016 г.). – Иркутск, 2016. – Т. 2. – С. 369–373.
11. Мямлін, С. В. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, Д. М. Барановський // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 110–117. doi: 10.15802/stp2015/57034
12. Остаточный срок службы детали и алгоритм управления фактическим состоянием грузового вагона с учётом требуемого уровня риска возникновения опасного отказа / П. А. Устич, А. А. Иванов, Ф. А. Мажидов, А. А. Салтыкова // News of science : Proceedings of materials the international scientific conference (Czech Republic, Karlovy Vary ; Russia, Moscow, 30–31 August 2015). – Karlovy Vary ; Kirov, 2015. – С. 83–94.
13. Рейдемейстер, А. Г. Способы увеличения прочности боковых рам трехэлементных тележек / А. Г. Рейдемейстер, А. А. Шикунов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 141–149. doi: 10.15802/stp2015/55351
14. Устич, П. А. Надежность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – Москва : УМЦ МПС, 2004. – 416 с.
15. Fomin, O. V. Improvement of upper bunding of side wall of gondola cars of 12-9745 model / O. V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 7, No. 1. – P. 45–48.
16. Myamlin, S. V. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing / S. V. Myamlin, D. Baranovskiy // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 7. – С. 61–66. doi: 10.15802/pte.v0i7.32096
17. Pradhan, S. Application of Semi-Hertzian Approach to Predict the Dynamic Behavior of Railway Vehicles Through a Wear Evolution Model / Smitirupa Pradhan, Arun Kumar Samantaray, Ranjan Bhattacharyya / Journal of Friction and Wear. – 2017. – Vol. 38. – Iss. 6. – P. 437–443. doi: 10.3103/s1068366617060125
18. Shykunov, O. A. Three-element bogie side frame strength / O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 183–193. doi: 10.15802/stp2017/92535
19. Zhao, F. Influence of small stress cycles on the fatigue damage of C70E car body / F. Zhao, J. Xie // Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 10. – P. 121–126. doi: 10.3901/jme.2014.10.121

В. Ю. ШАПОШНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-649

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета. У науковій роботі необхідно дослідити технічний стан вантажних вагонів під час їх експлуатації. Зазначена мета передбачає розв'язання таких завдань: 1) описати технічний стан вантажного вагона в період технічного обслуговування й ремонту; 2) з'ясувати залежності ймовірності перебування вантажного вагона в робочому стані протягом циклу існування; 3) уточнити вираз для коефіцієнта технічної готовності вагонного парку. **Методика.** Для досягнення поставленої мети автором були розглянуті методологічні підходи до визначення різних стадій життєвого циклу вантажного вагона. Система зміни й переходу технічного стану вантажного вагона описана за допомогою диференціальних рівнянь. **Результати.** У випадку неусталеного процесу зміни технічного стану вантажного вагона ймовірнісна характеристика відповідної стадії життєвого

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

циклу залежить від величини часу. Інтенсивність вхідного й вихідного потоків корелюються між собою з урахуванням імовірності перебування вантажного вагона на відповідній стадії його життєвого циклу. **Наукова новизна.** Переходи з одного життєвого циклу вагона в інший відбуваються стрибкоподібно, тобто таким переходам властивий випадковий процес. Імовірність перебування вантажного вагона у відповідному життєвому циклі визначається його попереднім технічним станом. Загальна величина сукупності всіх можливих станів складається з ланцюга Маркова для випадкових процесів із випадковими станами й безперервним потоком часу. У результаті дослідження вперше отримана залежність імовірності перебування вантажного вагона в робочому стані протягом циклу існування. **Практична значимість.** На основі отриманого визначення для ймовірності перебування вантажного вагона в робочому стані було уточнено вираз для коефіцієнта технічної готовності вагонного парку.

Ключові слова: вантажний вагон; надійність; життєвий цикл вагона; схема технічного стану; коефіцієнт технічної готовності; вагонний парк

В. Ю. ШАПОШНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цель. В научной работе необходимо исследовать техническое состояние грузовых вагонов при их эксплуатации. Указанная цель предполагает решение следующих задач: 1) описать техническое состояние грузового вагона в период технического обслуживания и ремонта; 2) выяснить зависимости вероятности нахождения грузового вагона в рабочем состоянии в течение цикла существования; 3) уточнить выражение для коэффициента технической готовности вагонного парка. **Методика.** Для достижения поставленной цели автором были рассмотрены методологические подходы к определению различных стадий жизненного цикла грузового вагона. Система изменения и перехода технического состояния грузового вагона описана с помощью дифференциальных уравнений. **Результаты.** В случае неустановившегося процесса изменения технического состояния грузового вагона вероятностная характеристика соответствующей стадии жизненного цикла зависит от величины времени. Интенсивность входного и выходного потоков коррелируются между собой с учетом вероятности пребывания грузового вагона на соответствующей стадии его жизненного цикла. **Научная новизна.** Переходы с одного жизненного цикла вагона в другой происходят скачкообразно, то есть таким переходам присущий случайный процесс. Вероятность нахождения грузового вагона в соответствующем жизненном цикле определяется его предыдущим техническим состоянием. Общая величина совокупности всех возможных состояний состоит из цепи Маркова для случайных процессов со случайными состояниями и непрерывным потоком времени. В результате исследования впервые получена зависимость вероятности пребывания грузового вагона в рабочем состоянии в течение цикла существования. **Практическая значимость.** На основе полученного определения вероятности нахождения грузового вагона в рабочем состоянии было уточнено выражение для коэффициента технической готовности вагонного парка.

Ключевые слова: грузовой вагон; надежность; жизненный цикл вагона; схема технического состояния; коэффициент технической готовности; вагонный парк

REFERENCES

1. Bosov, A. A., & Loza, P. A. (2015). *Teoriticheskie osnovy ratsionalnogo soderzhaniya podvizhnogo sostava zheleznikh dorog: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Driant. (in Russian)
2. Bocharov, P. P., & Pechinkin, A. V. (2005). *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
3. Bulinskiy, A. V., & Shiryaev, A. N. (2005). *Teoriya sluchaynykh protsessov*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Dyurgerov, N. G., Morozkin, I. S., & Krotov, V. N. (2011). *Vosstanovlenie i povyshenie iznosostoykosti detaley vagonov: Uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. Rostov-on-Don. (in Russian)
5. Korn, G., & Korn, T. (1974). *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya, teoremy, formuly. Perevod s angliyskogo*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Muradyan, L. A., & Shaposhnik, V. Yu. (2017). Automatic identification of separate parts of vehicle with implementation of new concepts of maintenance and repair implementation. *Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 4, 44-50. (in Ukrainian)
7. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Mishchenko, A. A. (2016). Methodological fundamentals of determination of unpowered rolling stock maintenance characteristics. *Science and Transport Progress*, 1(61), 169-179. doi: 10.15802/stp2016/61044 (in Russian)
8. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Podosenov, D. A. (2016). Improving the reliability of freight wagons with the use of new manufacturing technologies and regeneration of working surfaces. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 11, 49-54. (in Russian)
9. Myamlin, V. V. (2014). *Teoreticheskie osnovy sozdaniya gibkikh potochnykh proizvodstv dlya remonta podvizhno-go sostava: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Standart-Servis. (in Russian)
10. Myamlin, S. V., Muradyan, L. A., & Shaposhnik, V. Yu. (2016). Opredelenie strategii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta vagonnoy tekhniki. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy VII-oy Mezhdunar nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Irkutsk, 29 march–1 april)*, 2, 369-373. (in Russian)
11. Myamlin, S. V., Muradyan, L. A., & Baranovskiy, D. M. (2015). Problem of the definition the «reliability» term. Methodology of construction and study the reliability of freight cars. *Science and Transport Progress*, 6(60), 110-117. doi: 10.15802/stp2015/57034 (in Ukrainian)
12. Ustich, P. A., Ivanov, A. A., Mazhidov, F. A., & Saltykova, A. A. (2015). Ostatochnyyi srok sluzhby detali i algoritm upravleniya fakticheskim sostoyaniem gruzovogo vagona s uchetom trebuemogo urovnya riska vozniknoveniya opasnogo otkaza. *News of science: Proceedings of materials the international scientific conference (Czech Republic, Karlovy Vary ; Russia, Moscow, 30–31 August)*, 83–94. (in Russian)
13. Reydemeyster, A. G., & Shikunov, A. A. (2015). Strength increase methods of the side frame of the bogie in three-piece trucks. *Science and Transport Progress*, 5(59), 141-149. doi: 10.15802/stp2015/55351 (in Russian)
14. Ustich, P. A., & Karpychev, V. A., & Ovechnikov, M. N. (2004). *Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava*. Moscow: UMTs MPS. (in Russian)
15. Fomin, O. V. (2015). Improvement of upper bunding of side wall of gondola cars of 12-9745 model. *Metallurgical and Mining Industry*, 7(1), 45-48. (in English)
16. Myamlin, S. V., & Baranovskiy, D. (2014). The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. *The Problems of the Transport Economics*, 7, 61-66. doi: 10.15802/pte.v0i7.32096 (in English)
17. Pradhan, S. (2017). Application of Semi-Hertzian Approach to Predict the Dynamic Behavior of Railway Vehicles Through a Wear Evolution Model. Smitirupa Pradhan, Arun Kumar Samantaray, Ranjan Bhattacharyya. *Journal of Friction and Wear*, 38(6), 437-443. doi: 10.3103/s1068366617060125 (in English)
18. Shykunov, O. A. (2017). Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*, 1(67), 183-193. doi: 10.15802/stp2017/92535 (in English)
19. Zhao, F., & Xie, J. (2014). Influence of small stress cycles on the fatigue damage of C70E car body. *Journal of Mechanical Engineering*, 50(10), 121-126. doi: 10.3901/jme.2014.10.121 (in English)

Received: March 29, 2018

Accepted: July 11, 2018

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**М. М. БІЛЯЄВ, І. В. КАЛАШНІКОВ,
В. А. КОЗАЧИНА**
ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПОЯСУ БЕЗПЕКИ ПРИ
ТЕРАКТАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНИХ
АГЕНТІВ..... 7

О. П. КРОТ, О. І. РОВЕНСЬКИЙ, В. В. КОНЄВ
ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ,
ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ..... 15

А. В. САМАРСЬКА, Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО
ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
НА НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ
У ҐРУНТАХ..... 25

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. Г. ЛОЗА
ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ АВАРІЙНО-
ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ ПІД ЧАС
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА
ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ..... 36

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**Т. П. ПАВЛЕНКО, В. М. ШАВКУН, В. І. СКУРІХІН,
Н. П. ЛУКАШОВА**
МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДМОВ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ПІД ЧАС
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРОЛЕЙБУСІВ..... 47

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

**С. М. СЕМЕНЕЦЬ, С. С. НАСОНОВА,
Г. І. СЕМЕНЕЦЬ**
ОПТИМАЛЬНЕ СТРУКТУРНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ..... 60

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

А. О. ВЛАСОВ, С. В. ЗДАНЕВИЧ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОДОТРИМАЧА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ
ВІБРАЦІЇ ЕЛЕКТРОДА..... 68

Р. П. ПОГРЕБНЯК
ПОВТОРЮВАНІ ЗВ'ЯЗКИ У СХЕМАХ
СТРИЖНЬОВОГО ПОВЗУННО-ШАТУННОГО
МЕХАНІЗМУ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО
ПРИСТРОЮ..... 81

В. В. СУГЛОБОВ, С. В. РАКША, К. В. ТКАЧУК
ВИЗНАЧЕННЯ ВАРІЙОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ
ПАРАМЕТРІВ ЗРІВНОВАЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ
ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ..... 89

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В. Л. ГОРОБЕЦЬ, В. В. КОВАЛЕНКО
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПЕРЕДЧАСНОГО
РУЙНУВАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА ТЕПЛОВОЗА
2ТЕ116..... 101

М. І. КАПЦА, О. М. ГНЕННИЙ, Д. В. БОБИР
ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ КОЛІСНО-
МОТОРНИХ БЛОКІВ ТЕПЛОВОЗА
З ВИКОРИСТАННЯМ МОТОРНО-ОСЬОВИХ
ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ..... 111

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, О. А. ШИКУНОВ
ЧУТЛИВІСТЬ НАПРУЖЕНЬ ДО СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА
ЛИТІ ДЕТАЛІ ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ..... 125

В. Ю. ШАПОШНИК
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ПІД
ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ..... 134

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, И. В. КАЛАШНИКОВ,
В. А. КОЗАЧИНА**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПОЯСА БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ ТЕРАКТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ
АГЕНТОВ 7

О. П. КРОТ, А. И. РОВЕНСКИЙ, В. В. КОНЕВ
ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ,
ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ
ТРАНСПОРТЕ 15

А. В. САМАРСКАЯ, Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА НА НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ
МЕТАЛЛОВ В ГРУНТАХ 25

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

В. Г. ЛОЗА
ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ
АВАРИЙНО- ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ
В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ 36

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

**Т. П. ПАВЛЕНКО, В. М. ШАВКУН,
В. И. СКУРИХИН, Н. П. ЛУКАШОВА**
МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТРОЛЛЕЙБУСОВ 47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ

С. Н. СЕМЕНЕЦ, С. С. НАСОНОВА, Г. И. СЕМЕНЕЦ
ОПТИМАЛЬНОЕ СТРУКТУРНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 60

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

А. А. ВЛАСОВ, С. В. ЗДАНЕВИЧ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ ДЛЯ
УМЕНЬШЕНИЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОДА 68

Р. П. ПОГРЕБНЯК
ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ СВЯЗИ В СХЕМАХ
СТЕРЖНЕВОГО ПОЛЗУННО-ШАТУННОГО
МЕХАНИЗМА ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА 81

В. В. СУГЛОБОВ, С. В. РАКША, Е. В. ТКАЧУК
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАРЬИРУЕМЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ УРАВНОВЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ 89

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

В. Л. ГОРОБЕЦ, В. В. КОВАЛЕНКО
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО
РАЗРУШЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА
ТЕПЛОВОЗА 2ТЭ116 101

М. И. КАПИЦА, О. Н. ГНЕННЫЙ, Д. В. БОБЫРЬ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ КОЛЕСНО-
МОТОРНЫХ БЛОКОВ ТЕПЛОВОЗА С
ПРИМЕНЕНИЕМ МОТОРНО-ОСЕВЫХ
ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ 111

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, А. А. ШИКУНОВ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ К СИЛАМ,
ДЕЙСТВУЮЩИМ НА ЛИТЫЕ ДЕТАЛИ ТЕЛЕЖЕК
ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ 125

В. Ю. ШАПОШНИК
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ 134

CONTENTS

TRANSPORT ECOLOGY

- M. M. BILIAIEV, I. V. KALASHNIKOV,
V. A. KOZACHYNA**
DEFINITION OF «SAFETY BOUNDARY» IN CASE OF
TERRORIST ATTACK WITH CHEMICAL AGENTS..... 7
- O. P. KROT, O. I. ROVENSKYI, V. V. KONIEV**
THERMAL TREATMENT OF SOLID WASTE
GENERATED BY RAILWAY TRANSPORT..... 15
- A. V. SAMARSKA, Y. V. ZELENKO**
ASSESSMENT OF THE RAILWAY INFLUENCE
ON THE HEAVY METAL
ACCUMULATION IN SOIL..... 25

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

- V. G. LOZA**
ORGANIZATION PECULIARITIES OF ACCIDENT
RECOVERY WORKS DURING EMERGENCY
SITUATIONS AT RAILWAY TRANSPORT 36

ELECTRIC TRANSPORT

- T. P. PAVLENKO, V. M. SHAVKUN, V. I. SKURIKHIN,
N. P. LUKASHOVA**
METHODOLOGY OF DETERMINING THE
PARAMETERS OF TRACTION ELECTRIC MOTOR
FAILURES WHEN OPERATING TROLLEYBUSES 47

TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING

- S. N. SEMENETS, S. S. NASONOVA, G. I. SEMENETS**
OPTIMAL STRUCTURAL RESERVATION OF
TECHNICAL SYSTEMS 60

NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODEL. MACHINES AND MECHANISMS

- A. O. VLASOVI, S. V. ZDANEVICH**
IMPROVING THE MECHANICAL SYSTEM OF THE
ELECTRODE HOLDER TO REDUCE ELECTRODE
VIBRATION..... 68
- R. P. POGREBNIYAK**
REPEATED CONNECTIONS IN THE SCHEMES
OF LINK SLIDER-CRANK MECHANISM OF GRIPPING
DEVICE 81
- V. V. SUGLOBOV, S. V. RAKSHA, K. V. TKACHUK**
DETERMINATION OF THE VARIED CONSTRUCTIVE
PARAMETERS FOR BALANCING UNITS OF PORTAL
CRANES 89

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

- V. L. HOROBETS, V. V. KOVALENKO**
INVESTIGATION OF PREMATURE DESTRUCTION
CAUSES OF LOCOMOTIVE 2TE116 CRANKSHAFT ... 101

- M. I. KAPITSA, O. M. HNENNYI, D. V. BOBYR**
EFFICIENCY OF MODERNIZATION OF WHEEL-MOTOR
BLOCKS USING ANTI-FRICTION TRACTION MOTOR
SUPPORT BEARINGS 111

- O. G. REIDEMEISTER, O. A. SHYKUNOV**
SENSITIVITY OF STRESSES TO THE FORCES ACTING
ON THE CAST PARTS OF FREIGHT-CAR BOGIE 125

- V. Y. SHAPOSHNYK**
THEORETICAL STUDIES ON THE PROCESS OF
CHANGE OF THE TECHNICAL CONDITION OF
FREIGHT CARS IN OPERATION 134

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;

4) Оригінал експертного висновку.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№4 (76) 2018

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 16,97. Тираж 100 пр. Зам. №02/04

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 4 (76) 2018

(на українском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – О. В. Поминова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 16,97. Тираж 100 экз. Зак. №02/04

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**

Адрес редакции, издателя:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепро, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Днепр, пр. Д. Яворницкого, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 4 (76) 2018

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 16,97. Circulation 100. Order no. 02/04

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2018. 4 (76). 1-146